

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Contributo para a definição de edifício com
necessidades quase nulas de energia para aquecimento
e arrefecimento: edifícios de habitação

Miguel Pereira Rebelo

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2012

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Contributo para a definição de edifício com necessidades quase nulas de energia para aquecimento e arrefecimento: edifícios de habitação

Miguel Pereira Rebelo

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de

Mestre Susana Maria Lasbarrères Camelo (LNEG)

Professora Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão (FCUL, LNEG)

2012

Abstract

The fast expansion of the building sector in the European Union has resulted in an increase of global energy consumption. Implementation of international policies and the achievement of goals for the reduction of the energy consumption are all key strategies to promote the development of more low energy consumption buildings.

This dissertation intends to study different residential buildings that are representative of the Portuguese housing stock through the application of a building software for habitation models, the Portuguese thermal regulation of buildings (RCCTE) and the new version of the same regulation, which is still in an evaluation stage. This study, along with a cost-optimal analysis, aims to understand if Portugal is in the direction of energy efficiency in the residential sector or if it should take other regulatory measures to fulfill its objectives.

Taking into account the current situation and near future of the national thermal regulation, the results allow the deducing about which are the constructive solutions and regulatory criteria that result into the economic optimum. However, in a larger reduction perspective of the energy consumption and with the objective of reaching out the nearly Zero Energy Buildings (nZEB), it is suggested the implementation of more restrictive energy savings measures and reference values at a national level.

Keywords: economic optimum; energy savings; nZEB; residential buildings; RCCTE

Resumo

A expansão expressiva do sector dos edifícios na União Europeia tem resultado no aumento do consumo total de energia. A adoção de políticas e cumprimento de metas internacionais para a redução desse consumo consistem em estratégias chave que permitem aumentar o número de edifícios de baixo consumo energético.

A presente dissertação pretende estudar diferentes edifícios residenciais representativos do parque habitacional português através da aplicação de um *software* de construção de modelos habitacionais, do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado no Decreto-Lei n.º 80/2006, e da nova versão do mesmo regulamento que se encontra, presentemente, em fase de desenvolvimento. A metodologia adotada neste trabalho tem como objetivo analisar os requisitos de desempenho energético adotados no país, que se encontram em vigor e os que se encontram numa fase de avaliação. A partir deste estudo, juntamente com uma análise de custo-ótimo, pretende-se compreender se Portugal se encontra na direção da eficiência energética no sector residencial ou se devem ser tomadas outras medidas regulamentares com esse fim.

A partir dos resultados obtidos é possível deduzir quais as soluções construtivas e critérios regulamentares que resultam no ótimo económico, tendo em consideração a situação atual e futuro próximo da regulamentação térmica nacional. No entanto, numa perspetiva de maior redução do consumo de energia e com o fim de alcançar os edifícios de necessidades quase nulas de energia (nZEB), sugere-se a implementação de medidas de poupança energética e valores de referência mais restritivos a nível nacional.

Palavras-chave: edifícios residenciais; nZEB; ótimo económico; poupança energética; RCCTE

Agradecimentos

Este espaço é dedicado àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado.

Em primeiro lugar agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Marta Oliveira Panão, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e apoio ao longo da execução deste trabalho.

Gostaria de agradecer também todo o apoio, receptividade e disponibilidade em ajudar por parte da Engenheira Susana Camelo e restante equipa da Unidade de Energia e Ambiente Construído do LNEG.

A todos os meus amigos e colegas de curso, em especial aqueles que me acompanharam ao longo da elaboração da tese, e novas amizades desenvolvidas durante esse período, deixo uma palavra de agradecimento e de simpatia, pelo incentivo e paciência.

Por fim agradeço aos meus pais e família pelo interesse e apoio ao longo dos meus anos como estudante que me levaram até à conclusão desta etapa académica.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura	3
1.4	Motivação.....	3
2.	Consumo de energia no sector doméstico em Portugal.....	5
3.	Abordagem “ <i>top-down</i> ”	7
3.1	Contextualização geográfica e climática	7
3.2	Caraterização dos alojamentos	8
3.2.1	Área média por habitação.....	9
3.2.2	Número médio de pessoas por habitação	9
3.2.3	Soluções construtivas	10
3.2.4	Ganhos internos e condições de conforto	15
3.2.5	Sistemas de aquecimento e arrefecimento.....	16
3.3	Modelos desenvolvidos	18
3.4	Análise dos resultados de simulação	21
4.	Abordagem “ <i>bottom-up</i> ”	25
4.1	Classificação dos alojamentos.....	25
4.2	Casos de estudo	26
4.2.1	Descrição dos casos de estudo.....	27
4.2.2	Caracterização dos casos de estudo.....	29
4.3	Sistemas de aquecimento e arrefecimento.....	34
4.4	Análise energética dos casos de estudo	34
4.4.1	Casos com soluções construtivas originais.....	34
4.4.2	Casos com aplicação da nova metodologia	34
4.4.3	Casos com aplicação da metodologia em vigor – RCCTE 2006.....	40
4.5	Análise de resultados.....	41
5.	Análise de custo-ótimo	47

5.1	Definição do custo-ótimo	47
5.2	Metodologia de cálculo	48
5.3	Edifícios de referência para o cálculo do custo-ótimo	50
5.3.1	Isolamento térmico	51
5.3.2	Vãos envidraçados.....	52
5.4	Análise energética	53
5.5	Análise económica	54
5.5.1	Isolamento térmico	54
5.5.2	Vãos envidraçados.....	56
5.6	Análise de resultados.....	57
5.6.1	Isolamento térmico	57
5.6.2	Vãos envidraçados.....	60
5.7	Casos de estudo com soluções de custo-ótimo	63
6.	Conclusões	65
6.1	Desenvolvimentos futuros	68
7.	Referências	69
Anexo A.	Coeficientes de transmissão térmica de referência	71
Anexo B.	Parâmetros relevantes para a aplicação do RCCTE	73
Anexo C.	Tabelas de resultados da abordagem “ <i>bottom-up</i> ”	75
Anexo D.	Tabelas de resultados da análise de custo-ótimo	79
Anexo E.	Resultados da análise das soluções correspondentes ao ótimo económico	91

Índice de figuras

Figura 1 – Representação do conceito Trias Energética.....	1
Figura 2 – Evolução do consumo no sector doméstico e respetivo peso no consumo final total de energia (fonte: Balanço Energético (DGEG)).	5
Figura 3 – Distribuição do consumo de eletricidade por tipo de utilização (INE& DGEG 2011).	6
Figura 4 – Distribuição do parque habitacional português por épocas de construção (INE& DGEG 2011).	6
Figura 5 – Distribuição das residências fixas por tipologia e por região geográfica (INE 2000; INE& DGEG 2011).	8
Figura 6 – Representação da área média por alojamento consoante a tipologia da região (INE& DGEG 2011).	9
Figura 7 – Distribuição do número médio de indivíduos por alojamento em função da tipologia da região (INE& DGEG 2011).	10
Figura 8 – Taxa de utilização de diferentes tipos de envidraçados em diferentes orientações (INE& DGEG 2011).	14
Figura 9 – Taxa de posse de equipamentos utilizados para aquecimento do ambiente (INE& DGEG 2011).	16
Figura 10 – Taxa de posse de equipamentos utilizados para arrefecimento do ambiente (INE& DGEG 2011).	17
Figura 11 – Distribuição dos sistemas de climatização por região (INE 1997; INE& DGEG 2011). ..	18
Figura 12 – Esquema representativo das diferenças que caracterizam os modelos em estudo.	19
Figura 13 – Representação do edifício residencial multifamiliar, visto de NW e SE, respetivamente. ...	19
Figura 14 – Representação do edifício residencial unifamiliar, visto de NW e SE, respetivamente. ...	19
Figura 15 – Resultados da simulação para a tipologia de apartamento. A ilustração à esquerda representa as necessidades de energia para aquecimento, e à direita as necessidades de energia para arrefecimento.	21
Figura 16 – Resultados da simulação para a tipologia de moradia. A ilustração à esquerda representa as necessidades de energia para aquecimento, e à direita as necessidades de energia para arrefecimento.	21
Figura 17 – Resultados das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento e respetivos valores limites para a região de Faro. (a) Situação de valores de U reais segundo o RCCTE de 2006;	

(b) Situação de valores de U_{ref} segundo o RCCTE de 2006; (c) Situação de valores de U_{ref} segundo o novo RCCTE; (d) Situação de utilização das duas versões do RCCTE..... 42

Figura 18 – Resultados das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e respetivos valores limites para a região de Bragança. (a) Situação de valores de U reais segundo o RCCTE de 2006; (b) Situação de valores de U_{ref} segundo o RCCTE de 2006; (c) Situação de valores de U_{ref} segundo o novo RCCTE..... 43

Figura 19 – Curva de custos: posição do custo-ótimo, dos requisitos mínimos implementados e do custo associado a edifícios de necessidades quase nulas de energia (The Buildings Performance Institute Europe 2011)...... 48

Figura 20 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de isolamento térmico, para os diferentes casos de estudo, na região de Bragança..... 57

Figura 21 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de isolamento térmico, para os diferentes casos de estudo, na região do Porto. 57

Figura 22 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de isolamento térmico, para os diferentes casos de estudo, na região de Lisboa. 58

Figura 23 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de vidros, para os diferentes casos de estudo, na região de Bragança..... 60

Figura 24 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de vidros, para os diferentes casos de estudo, na região do Porto. 60

Figura 25 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de vidros, para os diferentes casos de estudo, na região de Lisboa. 61

Figura 26 – Resultados das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e respetivos valores limites para a região de Bragança. À esquerda, os resultados referentes à aplicação do novo RCCTE. A ilustração da direita representa o RCCTE de 2006..... 63

Figura 27 – Resultados das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento e respetivos valores limites para a região de Lisboa. À esquerda, os resultados referentes à aplicação do novo RCCTE. A ilustração da direita representa o RCCTE de 2006..... 64

Índice de tabelas

Tabela 1 – Caracterização climática dos concelhos considerados para o estudo.	7
Tabela 2 – Espessuras de isolamento consideradas e coeficientes de transmissão térmica de referência para os elementos da envolvente.	13
Tabela 3 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos comuns aos modelos unifamiliares e multifamiliares.	13
Tabela 4 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos associados aos modelos multifamiliares.	14
Tabela 5 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos associados aos modelos unifamiliares.	14
Tabela 6 – Propriedades térmicas dos vidros.	15
Tabela 7 – Modelos desenvolvidos para cada região em estudo.	20
Tabela 8 – Consumos elétricos para climatização no setor doméstico em Portugal.	22
Tabela 9 – Consumos elétricos para climatização por alojamento segundo diferentes abordagens.	23
Tabela 10 – Apresentação dos casos de estudo analisados segundo a abordagem “ <i>bottom-up</i> ” (fonte: <i>Google Earth</i>).	26
Tabela 11 – Caracterização geométrica: área de paredes e vãos envidraçados.	30
Tabela 12 – Dados relativos à ventilação e caracterização geométrica.	31
Tabela 13 – Caracterização térmica: paredes e coberturas.	32
Tabela 14 – Caracterização térmica: vãos envidraçados.	33
Tabela 15 – Dados climáticos para cada região em estudo.	38
Tabela 16 – Constituição e caracterização térmica das fachadas.	51
Tabela 17 – Constituição e caracterização térmica das coberturas.	52
Tabela 18 – Constituição e caracterização térmica dos vãos envidraçados.	53
Tabela 19 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de isolamento térmico para a região de Bragança.	55
Tabela 20 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de isolamento térmico para a região do Porto.	55
Tabela 21 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de isolamento térmico para a região de Lisboa.	55
Tabela 22 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de vidro para a região de Bragança.	56

Tabela 23 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de vidro para a região do Porto.	56
Tabela 24 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de vidro para a região de Lisboa.	56
Tabela 25 – Resumo dos pontos de custo-ótimo para a solução de isolamento térmico.....	59
Tabela 26 – Resumo dos pontos de custo-ótimo para a solução dos vãos envidraçados.	62
Tabela 27 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e vãos envidraçados, em $W/(m^2.K)$	71
Tabela 28 - Coeficientes de transmissão térmica lineares de referência do novo regulamento, em $W/(m.K)$	71
Tabela 29 – Fator de orientação	73
Tabela 30 – Fração envidraçada para diferentes caixilharias	73
Tabela 31 – Fator de correção para a estação de arrefecimento	74
Tabela 32 – Valores da intensidade média da radiação solar e da temperatura exterior média na estação de arrefecimento para cada região em estudo.....	74
Tabela 33 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em $kWh/(m^2.ano)$, na região de Bragança.....	75
Tabela 34 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em $kWh/(m^2.ano)$, na região de Coimbra.....	76
Tabela 35 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em $kWh/(m^2.ano)$, na região de Évora.	76
Tabela 36 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em $kWh/(m^2.ano)$, na região de Faro.....	77
Tabela 37 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em $kWh/(m^2.ano)$, na região de Lisboa.	77
Tabela 38 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em $kWh/(m^2.ano)$, na região do Porto.	78

Tabela 39 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (0 cm)	79
Tabela 40 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (2 cm)	79
Tabela 41 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (4 cm)	80
Tabela 42 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (6 cm)	80
Tabela 43 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (8 cm)	81
Tabela 44 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (10 cm)	81
Tabela 45 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (12 cm)	82
Tabela 46 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro simples).....	82
Tabela 47 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro duplo,4/6/6).....	83
Tabela 48 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro duplo, 6/16/6).....	83
Tabela 49 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m ² .ano), associadas à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro duplo de b.e., 6/16/6)	84
Tabela 50 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (2 cm).....	84
Tabela 51 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (4 cm).....	85
Tabela 52 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (6 cm).....	85
Tabela 53 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (8 cm).....	86
Tabela 54 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (10 cm).....	86
Tabela 55 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (12 cm).....	87
Tabela 56 – Custos, em €, associados à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro simples).....	87
Tabela 57 – Custos, em €, associados à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro duplo, 4/6/6). 88	
Tabela 58 – Custos, em €, associados à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro duplo, 6/16/6)88	

Tabela 59 – Custos, em €, associados à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro duplo de b.e., 6/16/6)	89
Tabela 60 – Resultados referentes às soluções correspondentes ao ótimo económico, segundo a metodologia do RCCTE de 2006, em kWh/(m ² .ano).....	91
Tabela 61 – Resultados referentes às soluções correspondentes ao ótimo económico, segundo a metodologia do RCCTE em fase de análise, em kWh/(m ² .ano).	91

Lista de símbolos

a	parâmetro para o cálculo de η	[-]
A	área do elemento da envolvente	[m ²]
A_{ext}	área da superfície da envolvente exterior	[m ²]
A_{int}	área da superfície da envolvente interior	[m ²]
A_j	área do elemento j	[m ²]
A_p	área útil de pavimento	[m ²]
$A_{s,i}$	área efetiva coletora da radiação solar na estação de aquecimento	[m ²]
$A_{s,inj}$	área efetiva coletora da radiação solar da superfície n com orientação j na estação de aquecimento	[m ²]
$A_{s,mj}$	área efetiva coletora da radiação solar da superfície n com orientação j na estação de arrefecimento	[m ²]
$A_{vão}$	área total do vão envidraçado	[m ²]
A_w	área de vãos	[m ²]
B_l	perímetro do elemento l , no caso de elementos em contacto com o solo, ou desenvolvimento linear da ponte térmica l , medido pelo interior	[m]
c	calor específico	[J/(kg.°C)]
$C_{a,i}$	custo de energia anual durante o ano i	[€]
C_g	custo global acrescido relacionado com o desempenho energético	[€/m ²]
C_g^{ref}	custo global relacionado com o desempenho energético do edifício de referência	[€]
C_l	custo de construção relacionado com o desempenho energético	[€]
e	espessura	[m]
e_{isol}	espessura do isolante térmico	[m]
FF	fator de forma da habitação	[-]
F_f	fator de sombreamento por elementos verticais	[-]
F_g	fração envidraçada	[-]
F_h	fator de sombreamento do horizonte	[-]

F_o	fator de sombreamento por elementos horizontais	[-]
F_s	fator de obstrução	[-]
F_w	fator de correção	[-]
$g_{\perp 100}$	fator solar de vãos com proteção solar 100% ativa e vidros incolores correntes	[-]
$g_{\perp,vi}$	fator solar do vidro para uma incidência da radiação solar normal ao vão	[-]
g_i	fator solar do vão envidraçado no inverno	[-]
g_v	fator solar do vão envidraçado no verão	[-]
g_{vref}	fator solar de referência para a estação de arrefecimento	[-]
GD	número de graus-dias de aquecimento	[°C.dia]
G_{sul}	valor médio mensal da energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento	[kWh/(m ² .mês)]
h_e	condutância térmica superficial exterior do elemento da envolvente	[W/(m ² .°C)]
H_v	perdas térmicas associadas à renovação de ar	[W/K]
i	ano de desconto	[ano]
I_r	intensidade média da radiação solar incidente na estação de arrefecimento	[kWh/m ²]
$I_{r,j}$	intensidade média da radiação solar incidente na estação de arrefecimento para cada orientação j	[kWh/m ²]
$I_{sol,ref}$	radiação solar média de referência	[kWh/m ²]
L_{pe}	perdas unitárias de calor através dos elementos em contacto com o solo	[W/K]
L_{pt}	perdas unitárias de calor através das pontes térmicas lineares	[W/K]
L_v	duração da estação de arrefecimento	[h]
M	duração média da estação convencional de aquecimento	[meses]
N_i	valor limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento	[kWh/(m ² .ano)]
N_{ic}	necessidades nominais de aquecimento	[kWh/(m ² .ano)]
N_v	valor limite das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento	[kWh/(m ² .ano)]
N_{vc}	necessidades nominais de arrefecimento	[kWh/(m ² .ano)]

P_d	pé-direito médio	[m]
q_i	ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento	[W/m ²]
Q_{ext}	perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados, pavimentos e coberturas em contacto com o exterior	[kWh]
Q_g	ganhos térmicos brutos	[kWh]
Q_{gu}	ganhos de calor úteis	[kWh]
$Q_{g,vref}$	ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento	[kWh]
Q_i	ganhos térmicos de fontes internas	[kWh]
Q_{lna}	perdas de calor por elementos em contacto com locais não aquecidos	[kWh]
Q_o	ganhos pela envolvente opaca	[kWh]
Q_{pe}	perdas de calor pelos elementos em contacto com o solo	[kWh]
Q_{pt}	perdas de calor pelas pontes térmicas lineares do edifício	[kWh]
Q_s	ganhos pelos vãos envidraçados	[kWh]
Q_t	perdas de calor por condução através da envolvente	[kWh]
Q_v	perdas de calor resultantes da renovação de ar	[kWh]
r	taxa de desconto	[%]
R	resistência térmica	[m ² .K/W]
$R_{betão}$	resistência térmica do betão	[m ² .K/W]
$R_{betonilha}$	resistência térmica da betonilha	[m ² .K/W]
$R_d(i)$	fator de desconto para o ano i	[-]
$R_{enrocamento}$	resistência térmica do enrocamento	[m ² .K/W]
R_{isol}	resistência térmica do isolante térmico	[m ² .K/W]
R_{ph}	taxa de renovação nominal do ar interior	[h ⁻¹]
R_{reboco}	resistência térmica do reboco	[m ² .K/W]
R_{se}	resistência térmica superficial exterior	[m ² .K/W]
R_{si}	resistência térmica superficial interior	[m ² .K/W]
$R_{tijoleira}$	resistência térmica da tijoleira	[m ² .K/W]
R_{tijolo}	resistência térmica do tijolo	[m ² .K/W]
R_{tot}	resistência térmica total	[m ² .K/W]
U	coeficiente de transmissão térmica	[W/(m ² .K)]

U_{ascen}	coeficiente total de transmissão térmica com fluxo de calor no sentido ascendente	[W/(m ² .K)]
U_{descen}	coeficiente total de transmissão térmica com fluxo de calor no sentido descendente	[W/(m ² .K)]
U_j	coeficiente de transmissão térmica do elemento j	[W/(m ² .K)]
U_{ref}	coeficiente de transmissão térmica de referência	[W/(m ² .K)]
V	volume interior da habitação	[m ³]
X_j	fator de orientação para as diferentes exposições dos envidraçados para cada orientação j	[-]
α	coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior do elemento	[-]
γ	razão entre os ganhos térmicos brutos e as perdas térmicas do edifício	[-]
η	fator de utilização dos ganhos térmicos	[-]
η_{vref}	fator de utilização de ganhos de referência	[-]
$\theta_{ext,v}$	temperatura exterior média na estação de arrefecimento	[°C]
$\theta_{ref,v}$	temperatura interior de referência na estação de arrefecimento	[°C]
λ	condutividade térmica	[W/(m.K)]
λ_{isol}	condutividade térmica do isolante térmico	[W/(m.K)]
ρ	massa volúmica	[kg/m ³]
τ	parâmetro relativo aos espaços não úteis	[-]
ψ_l	coeficiente de transmissão térmica linear do elemento ou ponte térmica l	[W/(m.K)]

Lista de siglas

COP	Coeficiente de Eficiência Energética no modo de aquecimento (<i>Coefficient Of Performance</i>)
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EER	Coeficiente de Eficiência Energética no modo de arrefecimento (<i>Energy Efficiency Ratio</i>)
EPBD	Diretiva relativa ao Desempenho Energético de Edifícios (<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>)
EPS	Poliestireno expandido (<i>Expanded polystyrene</i>)
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
ITeCons	Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências de Construção
IWEC	Dados climáticos internacionais para cálculos energéticos (<i>International Weather for Energy Calculation</i>)
NUTS	Nomenclaturas de Unidades Territoriais para fins Estatísticos
nZEB	Edifício de balanço de energia quase nulo (<i>Nearly Zero Energy Building</i>)
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
UE	União Europeia

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A sociedade apresenta, cada vez mais, tendências de aumento dos consumos de energia aliado ao desenvolvimento dos países e melhoria do conforto das populações. Este ritmo de crescimento é preocupante no sentido em que pode resultar em dificuldades no abastecimento energético, impactes significativos no ambiente e esgotamento de alguns recursos energéticos.

A redução do consumo energético, bem como o aumento da produção de energia proveniente de fontes renováveis são algumas das medidas necessárias para permitir, até 2020, a redução das emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 20% inferiores aos níveis verificados em 1990 e manter o aumento da temperatura global abaixo dos 2 °C (European Commission 2010).

Na União Europeia (UE), o sector dos edifícios encontra-se em expansão, tendendo o consumo de energia a acompanhar esse crescimento. Atualmente, este sector representa cerca de 40% do total do consumo de energia, sendo portanto essencial que os países estabeleçam metas e formem planos nacionais de forma a aumentar o número de edifícios que sejam de baixo consumo energético e também energeticamente eficientes. Estes objetivos podem ser alcançados atuando simultaneamente ao nível dos equipamentos utilizados nos edifícios, das características construtivas destes e do comportamento dos utilizadores. A implementação das medidas políticas e das ações referidas visa reduzir não só o consumo de energia, e consequentemente a redução da fatura associada a esse consumo por parte dos consumidores, como também as emissões de gases com efeito de estufa (European Commission 2010).

O diagrama seguinte apresenta o conceito *Trias Energetica*¹, cujos princípios se baseiam em alcançar a poupança energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis a partir da redução do consumo e diversificação das fontes de produção de energia (Entrop & Brouwers 2010).



Figura 1 – Representação do conceito *Trias Energetica*.

¹ Este conceito, desenvolvido por Duijvestein (1993) e Lysen (1996), resulta da evolução de um modelo holandês, originário da década de 70, sobre conservação ambiental. O modelo atual, adotado internacionalmente, consiste numa estratégia de três passos para alcançar a sustentabilidade energética em edifícios residenciais e de serviços.

O primeiro ponto apresentado na Figura 1 pode ser conseguido atuando ao nível da conservação de energia nos edifícios, apostando no conceito de edifícios com necessidades quase nulas de energia (nZEB²). Estes correspondem a edifícios que apresentam bons resultados a nível do comportamento energético e cujas necessidades de energia possam ser grandemente satisfeitas por fontes de energia renovável. O comportamento energético de um edifício é estudado tendo em consideração a quantidade e origem da energia anual consumida, necessária para suprimir as necessidades energéticas em causa, nomeadamente as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento de forma a manter a temperatura interior de conforto (European Commission 2010).

Na realidade, a definição de edifício com necessidades muito baixas de energia é variável de país para país. Os diferentes climas e culturas dos países da UE justificam que os requisitos mínimos implementados por cada país sejam diferentes tais como os métodos de cálculo. No entanto, a definição enunciada no parágrafo anterior é utilizada numa perspetiva geral. Este tipo de edifícios possuem níveis de isolamento elevados, infiltração de ar controlada, utilização adequada da iluminação, privilegiando a iluminação natural, bem como equipamentos, janelas e técnicas de *design* que favoreçam a eficiência energética, dando preferência a técnicas de aquecimento e arrefecimento passivas, como a utilização passiva da energia solar. A utilização ativa de energias renováveis, a nível local ou nas proximidades, deve ser fomentada (Thomsen & Wittchen 2008).

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal contribuir para a determinação de critérios que caracterizem os edifícios de necessidades energéticas reduzidas para aquecimento e arrefecimento, a partir da comparação com edifícios de habitação de referência definidos.

Com o objetivo de apurar os edifícios de referência, isto é, edifícios considerados “típicos” a nível nacional, e compreender de que forma as características das habitações e dos seus ocupantes interferem no consumo de energia no sector doméstico, foram desenvolvidos modelos estatísticos através de dois métodos distintos.

A primeira abordagem consiste na utilização do método “*top-down*”, ou seja, a partir de estatísticas nacionais construir modelos representativos das habitações “tipo” de Portugal. Para tal, foram reunidos e analisados diversos dados a nível nacional relacionados com as características das habitações e seus ocupantes, bem como os respetivos consumos energéticos. A abordagem “*bottom-up*”, permite também relacionar as características das habitações com o consumo de energia, mas a partir de informação recolhida para edifícios singulares (McLoughlin, Duffy et al. 2011).

Com a finalidade de desenvolver os modelos necessários para a caracterização dos edifícios de habitação de referência, seguindo a abordagem “*top-down*”, recorreu-se à informação presente no Inquérito ao Consumo de Energia no Sector doméstico, da responsabilidade do Instituto Nacional de Estatística (INE) e da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). A informação recolhida nesse documento tem como base um período compreendido entre Outubro de 2009 e Setembro de 2010.

A nível singular foram escolhidas diferentes habitações consideradas como representativas do sector doméstico em Portugal, cujas características fossem conhecidas de maneira a se poder aplicar o método “*bottom-up*”. A análise energética levada a cabo nesta secção do trabalho teve como base a metodologia de cálculo presente no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) aprovado pelo Decreto-Lei n.º 80/2006. Os casos de estudo foram ainda analisados segundo uma metodologia de cálculo que se prevê que

² *Nearly Zero Energy Building*

venha a substituir a do presente regulamento e que se encontra atualmente em fase de desenvolvimento.

Os modelos representados neste trabalho, no âmbito da primeira abordagem, foram desenvolvidos com o auxílio do *software DesignBuilder*, que permite a construção célere dos modelos representativos das habitações, que podem ser visualizados em 3D e consiste num interface para o programa de simulação energética *EnergyPlus*. Desenvolvido pelo departamento de Energia dos Estados Unidos da América, este programa de simulação energética possibilita a modelação das necessidades energéticas, nomeadamente de aquecimento e arrefecimento, dos edifícios em estudo (DesignBuilder Software Ltd 2010).

Após a fase de análise de dados e dos modelos construídos, com base nas duas abordagens referidas, e mediante uma análise de custo-ótimo, é então possível estabelecer critérios que sirvam para definir edifícios de habitação de referência e edifícios de necessidades energéticas reduzidas, nomeadamente relacionados com os sistemas de aquecimento e arrefecimento, no sector residencial em Portugal.

1.3 Estrutura

A estrutura da presente dissertação é caracterizada por seis capítulos e cinco anexos.

O capítulo 1, do qual faz parte esta secção do trabalho, introduz o assunto estudado, apresentando o conceito de nZEB e os objetivos fundamentais deste trabalho. A estrutura, responsável pela organização desta dissertação, bem como a motivação e contribuição deste trabalho são também aqui enunciadas.

No capítulo 2 apresenta-se, de forma resumida, um texto introdutório relacionado com a evolução do consumo de energia no sector doméstico em Portugal.

No capítulo 3 encontra-se descrita e analisada a metodologia de cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento que tem como base estatísticas nacionais e um *software* de construção de modelos residenciais.

No capítulo 4 apresentam-se e discutem-se outras metodologias de cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, sendo estas caracterizadas por casos reais e metodologias de cálculo associadas à Regulamentação Térmica de Edifícios nacional.

No capítulo 5 avaliam-se diversas medidas de poupança energética, aplicadas em diferentes casos de estudo, com base numa análise de custo-ótimo, cujo fim se prende em encontrar soluções construtivas eficientes do ponto de vista económico e energético.

No capítulo 6 discutem-se e sintetizam-se as conclusões retiradas deste trabalho.

O Anexo A apresenta os coeficientes de transmissão térmica de referência, associados ao Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios.

No Anexo B são apresentados diversos parâmetros relevantes para a aplicação das diferentes versões do RCCTE.

No Anexo C encontram-se os resultados da abordagem desenvolvida no capítulo 4.

No Anexo D são apresentados resultados da análise de custo-ótimo.

O Anexo E apresenta os resultados referentes à análise energética dos casos de estudo, tendo em consideração as soluções construtivas representativas do ótimo económico.

1.4 Motivação

A reformulação da diretiva 2002/91/EC, relacionada com o desempenho energético dos edifícios, originando a diretiva 2010/31/EU, resultou da necessidade de impulsionar os Estados Membros da União Europeia na redução do consumo energético no sector residencial e de serviços.

A diretiva de 2010 prevê que até 31 de Dezembro de 2020 todos os novos edifícios deverão ser edifícios de necessidades quase nulas de energia. Com esse objetivo, a diretiva propõe, entre outras medidas, a adoção de metodologias comuns para o cálculo do consumo de energia (European Commission 2012).

Tendo em conta que Portugal se prepara para avaliar os seus requisitos de desempenho energético para os novos edifícios, este trabalho pretende estabelecer estratégias que contribuam para alcançar os edifícios de baixo consumo de energia e assim seguir as metas Europeias estabelecidas para esse fim.

Atualmente, mais de metade dos edifícios de habitação existentes em Portugal foram construídos antes da década de 90, pelo que se considera relevante analisar, do ponto de vista energético e económico diferentes casos representativos desse sector e de diferentes períodos de construção. Este trabalho contribui para a avaliação energética desses casos de estudo em condições reais, bem como em condições de aplicação de valores de referência propostos pelo Regulamento Térmico nacional (metodologia em vigor e em fase de avaliação).

A comparação entre as metodologias e requisitos de desempenho energético das diferentes versões do RCCTE, bem como a análise de custo-ótimo, seguindo as diretivas Europeias, contribui para a definição de edifício com necessidades quase nulas de energia para aquecimento e arrefecimento.

2. Consumo de energia no sector doméstico em Portugal

Em Portugal, os hábitos de consumo de energia têm sofrido alterações ao longo dos últimos anos, sendo o sector doméstico um dos sectores que apresenta uma maior evolução relativamente ao aumento do consumo.

Apesar de se ter verificado um crescimento tendencial em termos de consumo no sector doméstico desde finais dos anos 80 até 2005, o peso desse relativamente ao consumo final total de energia apresentou uma queda justificada pelo aumento do consumo noutros sectores, como é o caso do sector dos transportes. A partir de 2005 assistiu-se ao oposto (ver Figura 2), uma quebra do consumo que no entanto sofreu uma nova subida em 2009, representando o consumo de energia no sector doméstico cerca de 17,7% do consumo total final de energia nesse ano. No ano seguinte, o sector doméstico, representava de novo uma tendência de quebra relativamente ao consumo total final (INE & DGEG 2011).

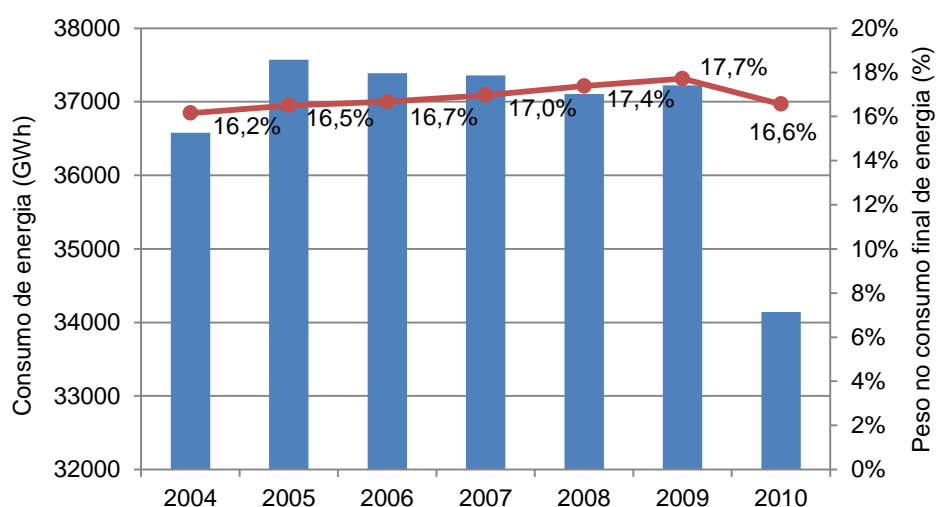


Figura 2 – Evolução do consumo no sector doméstico e respetivo peso no consumo final total de energia (fonte: Balanço Energético (DGEG)).

Em 2010, a principal fonte de energia utilizada nos alojamentos foi a eletricidade. No total das habitações existentes, estimou-se que o consumo total de eletricidade fosse de cerca de 14 442 GWh (ou 1 242 021 tep), sendo que cada alojamento em Portugal consumiu 3,7 MWh no período considerado no estudo. Tendo em conta que o consumo médio anual total de energia por alojamento foi de 8,6 MWh, é possível verificar que a eletricidade representou cerca de 43% do consumo total de energia no sector doméstico (INE & DGEG 2011).

A Figura 3 apresenta a distribuição do consumo de eletricidade num alojamento médio em Portugal Continental por tipo de utilização.

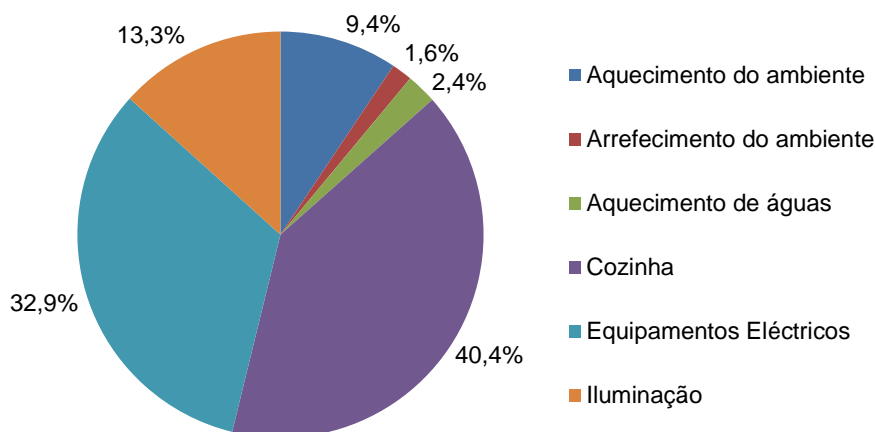


Figura 3 – Distribuição do consumo de eletricidade por tipo de utilização (INE & DGEG 2011).

O crescimento do consumo energético nos alojamentos ao longo dos anos encontra-se relacionado não só com o aumento do número de habitações, que se tem verificado, mas também com a melhoria da qualidade de vida e maior exigência de conforto térmico das mesmas e com o aumento da presença de diversos equipamentos, principalmente elétricos, para aquecimento e/ou arrefecimento do ambiente, aquecimento de águas, entretenimento entre outros. A baixa eficiência de alguns equipamentos e a sua utilização descuidada por parte dos utilizadores contribuem também para o aumento do consumo de energia nesse sector.

A idade dos alojamentos é também um fator importante no que toca ao consumo de energia. As medidas e políticas atuais referentes à eficiência energética podem ter algum impacto, na medida em que se verifica que os alojamentos mais modernos são energeticamente mais eficientes que os antigos, com perdas de energia superiores. Tendo em consideração que cerca de metade dos alojamentos em Portugal foram construídos em períodos anteriores a 1980 (ver Figura 4), deve-se apostar na reabilitação energeticamente eficiente de forma a reduzir os consumos nas habitações (INE & DGEG 2011).

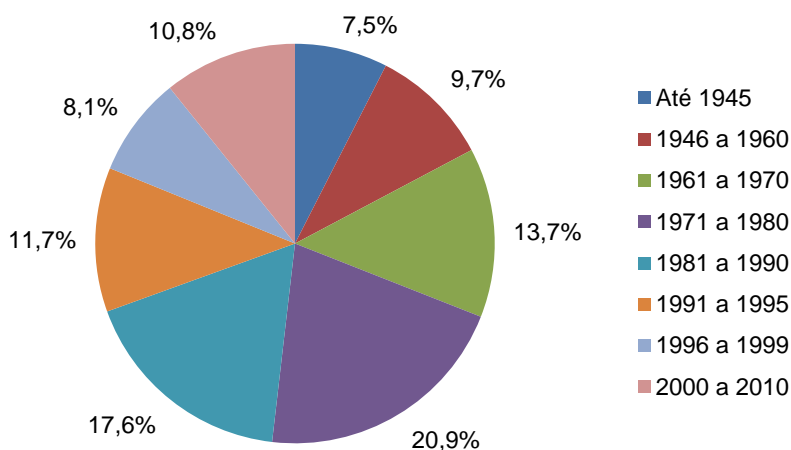


Figura 4 – Distribuição do parque habitacional português por épocas de construção (INE & DGEG 2011).

Tendo como base a informação relacionada com o parque habitacional português, pretende-se nos capítulos posteriores desenvolver o conceito de habitação de referência em Portugal tendo em consideração duas abordagens distintas: *top-down* e *down-up*.

3. Abordagem “*top-down*”

3.1 Contextualização geográfica e climática

Devido à sua localização geográfica, Portugal Continental apresenta um clima temperado mediterrânico, caracterizado por verões quentes e invernos moderados. Neste trabalho, os casos de estudo foram analisados em diferentes regiões do país justificando-se pelo facto de existir uma variação significativa do clima de sul para norte e do litoral para o interior.

A região Norte, em contraste com a região Sul, é caracterizada por temperaturas moderadas no verão e mais baixas no inverno, apresentando maior teor de humidade.

Comparando o Litoral com o interior do País, verifica-se que quanto maior for a distância ao mar mais frequente é a ocorrência de secas. As diferenças entre estas duas zonas traduzem-se então num maior contraste entre as temperaturas no verão e no inverno.

O relevo desempenha também um papel importante na caracterização climática de uma região. O efeito de barreira associado à altitude do local acentua as diferenças térmicas e de precipitação, resultando em invernos mais rigorosos e verões amenos (Porto Editora 2012).

De maneira a avaliar o comportamento dos modelos desenvolvidos, quando aplicados a diferentes climas, procedeu-se à simulação tendo em consideração concelhos representativos das regiões do NUTS II. São elas: Porto e Bragança, representando a região Norte; Lisboa, representando a região de Lisboa e Vale do Tejo; Coimbra, representando a região Centro; Évora, representando o Alentejo; e como representante do Algarve, a cidade de Faro.

A Tabela 1 apresenta as zonas climáticas em que se encontram abrangidos os concelhos relevantes neste estudo, de acordo com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios e sumariza alguns aspetos climáticos característicos de cada zona climática (Gonçalves & Graça 2004).

Tabela 1 – Caracterização climática dos concelhos considerados para o estudo.

Zona Climática de inverno	Zona Climática de verão	Concelhos em estudo	Caracterização do Clima
I1	V2	Coimbra, Faro e Lisboa	A influência marítima reflete-se em menores amplitudes térmicas diárias no verão; O verão pode apresentar maiores exigências que o inverno.
I1	V3	Évora	A influência continental reflete-se em climas mais secos e de elevadas amplitudes térmicas diárias; O verão pode apresentar maiores exigências que o inverno.
I2	V1	Porto	A influência marítima reflete-se em menores amplitudes térmicas diárias no verão; O inverno pode apresentar maiores exigências que o verão.
I3	V2	Bragança	A influência continental reflete-se em amplitudes térmicas diárias relevantes no verão; O inverno pode apresentar maiores exigências que o verão.

Os dados climáticos utilizados na simulação são originários de ficheiros IWEC (*International Weather for Energy Calculation*)³.

3.2 Caraterização dos alojamentos

De forma a entender quais as utilizações com maior consumo de energia nas habitações portuguesas é primeiro necessário compreender e caracterizar o parque habitacional português.

Em 2010, o número total de alojamentos⁴ em Portugal era de 3 932 010, dos quais 3 773 956 em Portugal Continental. Esta informação corresponde apenas a alojamentos que serviam de residência fixa aos agregados familiares, excluindo portanto os alojamentos secundários ou de utilização sazonal. Todos os valores utilizados daqui a adiante têm em consideração apenas as residências fixas (INE & DGEG 2011).

A distinção entre moradias e apartamentos para cada região da NUTS II é relevante para a caraterização do parque habitacional português. No entanto, devido à falta de informação referente ao ano em estudo, procedeu-se à interpolação dos dados referentes ao ano de 1998 de forma a serem atualizados para o ano de 2010. Sendo assim, tendo em conta o peso relativo das duas tipologias de alojamento disponíveis pelo inquérito à habitação de 1998, chegou-se à conclusão que a região de Lisboa é a única que apresentava um maior número de apartamentos comparativamente às moradias. Como seria de esperar, a região de Lisboa e Vale do Tejo e do Grande Porto são as que apresentavam um maior número de habitações (INE 2000). A Figura 5 apresenta o número de alojamentos utilizados como residência fixa, por tipologia de alojamento.

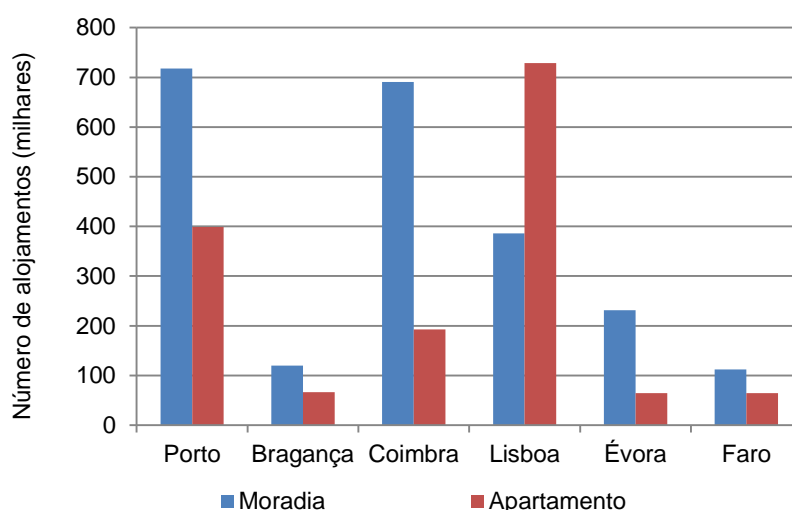


Figura 5 – Distribuição das residências fixas por tipologia e por região geográfica (INE 2000; INE & DGEG 2011).

Tendo em conta que a região Norte é representada por duas cidades, com diferentes características climáticas, distribuiu-se, por ambas, o número de habitações existentes na região Norte, utilizando o peso relativo das habitações no ano de referência.

³ Estes ficheiros contêm dados horários da temperatura do bolbo seco, da temperatura do ponto de orvalho, da radiação solar e, nalguns casos, dados de vento (ASHRAE 2011).

⁴ Um alojamento define-se como um local distinto e independente que se destina a habitação com a condição de não estar a ser utilizado totalmente para outros fins no momento de referência (INE & DGEG 2011).

3.2.1 Área média por habitação

A área média é um dos parâmetros característicos de uma habitação que tem sofrido alterações ao longo dos anos. Este parâmetro é variável consoante o número médio de divisões e a região considerada. A Figura 6 apresenta a variação da área média de uma habitação em função das tipologias de áreas urbanas, isto é, consoante se trata de uma zona maioritariamente rural (área rural), mediantemente urbana ou predominantemente urbana (área urbana) para as diferentes tipologias de alojamento (INE & DGEG 2011). Verifica-se que em média, a área de um apartamento é inferior à de uma moradia, apresentando pequenas variações entre ambas principalmente nas regiões predominantemente rurais. A área mediantemente urbana é a que apresenta o maior valor de área média por alojamento quando comparada com as restantes áreas.

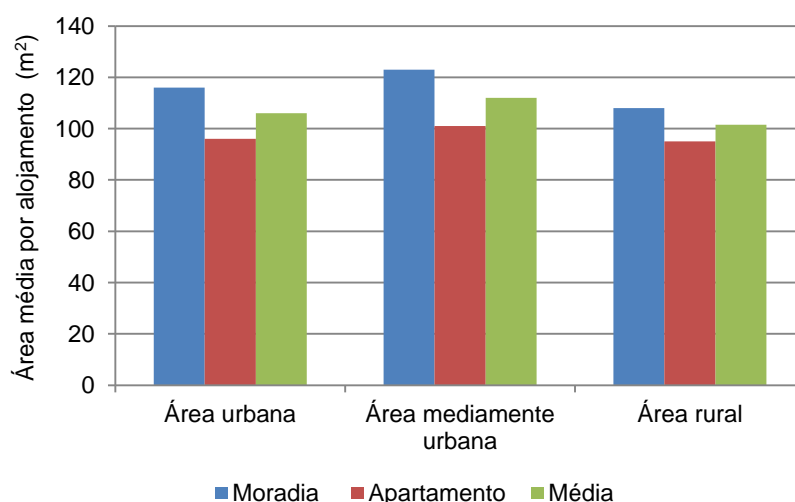


Figura 6 – Representação da área média por alojamento consoante a tipologia da região (INE & DGEG 2011).

Neste trabalho consideraram-se seis cidades portuguesas, representativas de diferentes regiões do sistema NUTS II, que se inserem na área predominantemente urbana. Tendo em conta que, em termos de clima, as zonas urbanas são também representativas das zonas rurais e que a diferença das áreas das habitações entre as duas zonas é pouco significativa, optou-se, como áreas médias por alojamento, pelos valores correspondentes às zonas com maior densidade populacional, isto é as áreas urbanas. Considerou-se que a área média de alojamento seria igual para as diferentes localidades consideradas, ou seja uma área de 116 m² e de 96 m² para uma moradia e um apartamento, respetivamente.

Relativamente ao número de divisões do alojamento, segundo dados referentes às novas habitações concluídas em 2010, verificou-se que para Portugal o número médio de divisões era de 4,9, sendo a região do Algarve a que apresenta o menor valor, com 4,2 divisões seguida de Lisboa com 4,8. Para as restantes regiões do sistema NUTS II, 5 era o valor médio de divisões (INE 2011).

3.2.2 Número médio de pessoas por habitação

Segundo os dados estatísticos de 2010 sobre o Consumo de Energia no Sector Doméstico, tem-se que, no período considerado pelo estudo e para o País inteiro, o número médio de indivíduos por alojamento rondava os 3 ocupantes, tanto para as moradias como para os apartamentos. Sabendo que a média para Portugal Continental é igual ao valor apresentado para o País, considerou-se que as diferentes localidades estudadas apresentavam valores aproximados à

média continental. Como tal, para efeitos de cálculo considerou-se um valor médio de 3 pessoas por habitação para todas as regiões (INE & DGEG 2011) .

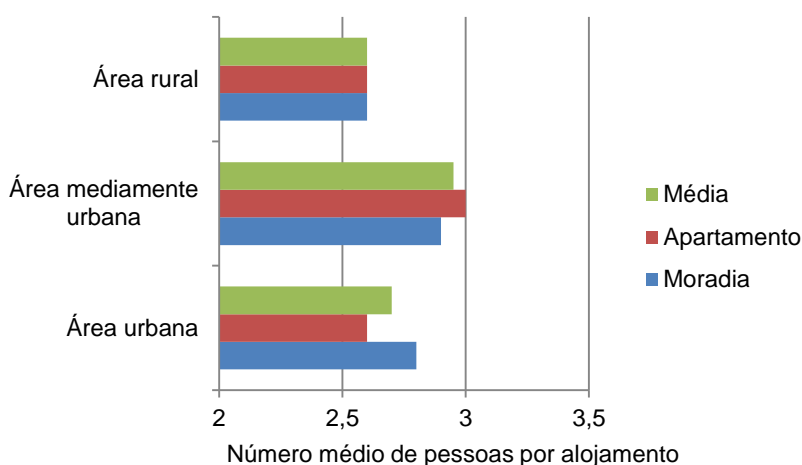


Figura 7 – Distribuição do número médio de indivíduos por alojamento em função da tipologia da região (INE & DGEG 2011).

Em termos de densidade de ocupação verificou-se que, para a tipologia de apartamento, por cada metro quadrado da habitação existiram 0,0313 pessoas, ou seja, em termos de disponibilidade de área por pessoa, cerca de 32 m²/pessoa. Relativamente à outra tipologia de alojamento, verificou-se uma densidade de ocupação inferior, resultante de uma maior área média, de 0,0259 pessoas por m² (aproximadamente 39 m²/pessoa).

3.2.3 Soluções construtivas

O consumo de energia para arrefecimento e aquecimento não depende apenas do rigor do clima, da área de habitação que se pretende aquecer/arrefecer e da temperatura que se deseja manter de forma a promover o conforto térmico da habitação. Outros fatores, como os ganhos solares, a dissipação de energia por parte dos ocupantes e equipamentos e as características da envolvente exterior, nomeadamente o grau de isolamento, são igualmente relevantes para o estudo do consumo energético.

O isolamento térmico é importante, no sentido que permite, não só a redução do consumo de energia, ao reduzir as perdas de calor, como também a uniformização da temperatura no interior da habitação e redução da ocorrência de humidade (CCE s.d.). Relativamente à sua localização, se este for colocado pelo interior irá reduzir a capacidade de armazenamento de calor da habitação, isto é reduz a inércia térmica. Sendo assim, o isolamento térmico aplicado ao exterior da envolvente é preferível para manter a inércia térmica dos modelos elaborados.

Segundo os dados estatísticos obtidos para o ano de 2010, verificou-se que apenas 21,1% dos alojamentos considerados no estudo possuíam paredes exteriores com isolamento, sendo a aplicação de isolamento na cobertura (para moradias e alojamentos que se encontram no último piso de um edifício residencial multifamiliar) uma prática ainda menos usual, com apenas 17,1% (INE & DGEG 2011).

Com base nesta informação foram considerados dois casos extremos, um em que não existe qualquer tipo de isolamento na envolvente e outro em que o isolamento está presente. Estas duas situações foram consideradas para a construção dos modelos tendo em consideração a região climática e tipologia de habitação.

Com o objetivo de calcular a espessura de isolamento adequada para cada situação, consideraram-se os valores dos coeficientes de transmissão térmica de referência presentes no Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE) (ver Tabela

2). O coeficiente de transmissão térmica de um elemento representa a quantidade de calor que atravessa uma dada área desse elemento tendo em conta a diferença de temperaturas entre os espaços que separa. Este coeficiente depende das características do elemento considerado, ou seja, depende da espessura e da condutividade térmica do material (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006).

Foram considerados os coeficientes de transmissão térmica de referência para diferentes zonas climáticas de inverno, sendo que Coimbra, Évora, Faro e Lisboa encontram-se incluídos na zona climática I1, Porto na I2 e Bragança na I3. Teve-se ainda em consideração diferentes posições do elemento construtivo, horizontal para os pavimentos e coberturas ou vertical para as paredes.

De forma a calcular a espessura do isolamento adequada para cada região teve-se em consideração que as paredes exteriores dos modelos desenvolvidos seriam semelhantes em todo o país e para as diferentes tipologias da habitação: constituídas por duas camadas de tijolo furado, com 15 cm de espessura cada, entre as quais existiria uma camada de poliestireno expandido (EPS). A parede seria ainda revestida tanto no interior como no exterior por uma camada de reboco de 2 cm.

Conhecendo as resistências térmicas superficiais presentes no RCCTE e as propriedades térmicas dos materiais de construção (ver Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5) foi possível então calcular a espessura da camada de poliestireno expandido para cada situação.

A resistência térmica é dada pela razão entre a espessura da camada e o valor da condutividade térmica do material constituinte. Sendo assim, a espessura da camada de isolante constituinte da parede pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$e_{isol} = \lambda_{isol} \times R_{isol} \quad (1)$$

onde λ_{isol} corresponde à condutividade térmica do EPS, considerou-se 0,04 W/(m.K) para todas as situações em que o isolante térmico é utilizado, e R_{isol} representa a sua resistência térmica, com unidades m².K/W. Esta última pode ser calculada por:

$$R_{isol} = R_{tot} - (2 \times R_{tijolo} + 2 \times R_{reboco} + R_{se} + R_{si}) \quad (2)$$

onde R_{tijolo} e R_{reboco} representam, respetivamente, a resistência térmica do tijolo e do reboco e R_{se} e R_{si} representam as resistências térmicas superficiais exterior e interior, tomando respetivamente os valores 0,04 m².K/W e 0,13 m².K/W. Para os valores das resistências térmicas superficiais recorreu-se ao RCCTE, onde estas se encontram em função do sentido do fluxo de calor e da posição do elemento construtivo. R_{tot} corresponde à resistência térmica total da parede, isto é, a soma das resistências térmicas das camadas de tijolo, de reboco e de isolante térmico, bem como das resistências térmicas superficiais, e é dado por:

$$R_{tot} = \frac{1}{U} \quad (3)$$

onde U corresponde ao coeficiente de transmissão térmica, com unidades W/(m².K).

Em relação à cobertura, considerou-se que as moradias presentes em cada região seriam constituídas por coberturas inclinadas, com desvão não habitado. Neste caso, sendo o desvão não habitado, deve ser dada preferência à solução de isolamento térmico aplicado sobre a esteira horizontal. A aplicação de isolamento nas vertentes das coberturas inclinadas levaria a maiores custos, justificados pela maior área a isolar, a climatização desnecessária do desvão não

habitado, e consequentemente maiores consumos de energia, e a uma deficiente ventilação do desvão.

Assumindo portanto que o isolamento seria colocado sobre a esteira horizontal, entre o desvão e o interior da habitação, calculou-se a espessura da camada de EPS. A esteira horizontal, para além da camada de isolamento, seria ainda constituída por uma camada de 20 cm de betão e um revestimento de teto em reboco de 2 cm.

Neste caso, a espessura de isolante será dada por:

$$e_{isol} = \lambda_{isol} \times [R_{tot} - (R_{betão} + R_{reboco} + 2 \times R_{si})] \quad (4)$$

onde $R_{betão}$ corresponde à resistência térmica do betão . Nesta expressão considerou-se duas vezes a resistência térmica superficial interior correspondente ao fluxo de calor no sentido ascendente, visto que a esteira horizontal faz a separação entre dois ambientes interiores, de um meio com temperatura média superior para um com temperatura mais baixa. Neste caso R_{si} toma o valor de $0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

No regulamento térmico nacional não existem requisitos, e consequentemente valores de coeficiente de transmissão térmica de referência, para os pavimentos em contacto com o solo. No entanto, considerou-se, para uniformizar as perdas pela envolvente, valores de referência iguais aos apresentados no regulamento para elementos exteriores em zonas opacas horizontais.

De forma a identificar a espessura de isolamento necessária para o pavimento das moradias para cada região, cumprindo com os valores de coeficiente de transmissão térmica nacionais de referência, considerou-se a seguinte constituição para o pavimento: 27 cm de enrocamento, 2 cm de betonilha de regularização e 1,5 cm de tijoleira.

De forma semelhante ao caso da cobertura, a espessura de isolante térmico pode ser calculada por:

$$e_{isol} = \lambda_{isol} \times [R_{tot} - (R_{tijoleira} + R_{betonilha} + R_{enrocamento} + R_{si})] \quad (5)$$

onde $R_{tijoleira}$, $R_{betonilha}$ e $R_{enrocamento}$ representam as resistências térmicas da tijoleira, betonilha e enrocamento, respetivamente. R_{si} corresponde à resistência térmica superficial interior, correspondente ao sentido descendente do fluxo de calor, de valor $0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Os modelos desenvolvidos para a situação de apartamento não justificam a presença de isolamento na cobertura nem no pavimento, visto que os apartamentos em estudo não se encontram localizados no último piso do edifício nem no piso térreo. No entanto os apartamentos que não sejam diretamente o objeto de estudo, mas que façam parte do mesmo edifício que este, podem influenciar os resultados da simulação. Como tal devem apresentar parâmetros, como a atividade, iluminação e sistemas de aquecimento e arrefecimento semelhantes ao apartamento estudado e ainda soluções construtivas que não interfiram significativamente nos resultados.

A Tabela 2 sumariza os resultados obtidos para a espessura de isolamento tendo em conta os diferentes valores dos coeficientes de transmissão térmica e da posição da envolvente.

Tabela 2 – Espessuras de isolamento consideradas e coeficientes de transmissão térmica de referência para os elementos da envolvente.

	Elementos da envolvente opaca								
	Coberturas			Pavimentos			Paredes		
Zona climática	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
e_{isol} (m)	0,067	0,076	0,087	0,056	0,065	0,076	0,018	0,027	0,041
U (W/(m ² .K))	0,50	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40	0,70	0,60	0,50

Em relação aos modelos em que não se considerou a presença de isolamento na envolvente, as soluções construtivas passaram por paredes exteriores constituídas por duas camadas de tijolo, revestidas exterior e interiormente por duas camadas de reboco, com as mesmas características térmicas e espessura que as consideradas anteriormente, separadas por um espaço de ar de 25 mm. O coeficiente de transmissão térmica correspondente a esta solução é de 0,86 W/(m².K).

Considerou-se que as paredes interiores seriam de alvenaria de tijolo furado (uma camada de 11 cm) revestida por reboco de ambos os lados e que seriam idênticas para todos os modelos.

Para a cobertura inclinada, referente aos modelos de moradia, optou-se por uma sugestão do *software* de construção utilizado: telhas de barro de 2,5 cm, uma camada de revestimento de 0,5 cm e um espaço de ar, entre ambos os materiais, de 20 mm. Por sua vez, a esteira horizontal da cobertura inclinada com desvão e o pavimento, referente à tipologia de moradia, mantêm a mesma estrutura, sem a camada de isolante.

Tanto a cobertura, como o pavimento dos modelos relacionados com a tipologia de apartamento, excluindo os alojamentos do piso térreo e superior do edifício multifamiliar, seriam constituídos por um revestimento de piso em madeira contraplacada (*Plywood*) leve, com uma espessura de 3 cm, uma betonilha de assentamento, de 5 cm, uma laje em betão normal, de 20 cm, e um revestimento de teto (reboco), com uma espessura de 2 cm.

Relativamente ao apartamento que se situa no último piso do edifício, considerou-se que, de forma a reduzir as perdas de calor, deveria ser constituído por uma cobertura horizontal isolada. Esta seria caracterizada por uma camada de reboco (2 cm), uma laje de betão (20 cm), betonilha de assentamento (5 cm), poliestireno expandido (2 cm) e 3 cm de material de acabamento.

O pavimento do apartamento térreo do edifício em estudo seria também diferente relativamente aos restantes apartamentos, visto que se encontra em contacto direto com o solo. Sendo assim o pavimento seria constituído por uma camada de enrocamento (27 cm), betonilha de regularização (2 cm) e de tijoleira (1,5 cm).

As tabelas seguintes apresentam as soluções construtivas utilizadas nos modelos e respetivas propriedades térmicas dos materiais (Santos & Matias 2009; DesignBuilder Software Ltd 2010; Moita 2010).

Tabela 3 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos comuns aos modelos unifamiliares e multifamiliares.

Soluções construtivas		λ (W/(m.K))	R (m ² .K/W)	ρ (kg/m ³)	c (J/(kg.K))
Paredes exteriores	Tijolo furado	0,39 ¹	0,39	1200,00	790,00
	Reboco	1,30	0,02	1800,00	820,00
Paredes interiores	Tijolo furado	0,41 ¹	0,27	1364,00	790,00
	Reboco	1,30	0,02	1800,00	820,00

¹ Os elementos não homogêneos como o tijolo furado são caracterizados pela resistência térmica. No entanto, para efeito de simulação, atribuiu-se um valor de condutividade térmica, necessário para o programa de simulação considerar o efeito da massa térmica.

Tabela 4 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos associados aos modelos multifamiliares.

Soluções construtivas		λ (W/(m.K))	R (m ² .K/W)	ρ (kg/m ³)	c (J/(kg.K))
Pavimentos/Coberturas interiores	Reboco	1,30	0,02	1800,00	820,00
	Betão	2,00	0,10	2300,00	840,00
	Betonilha	1,80	0,03	2000,00	1044,00
	Plywood	0,15	0,20	560,00	2500,00
Pavimento em contacto com o solo	Enrocamento	0,70	0,39	1800,00	1000,80
	Betonilha	0,70	0,03	1450,00	1044,00
	Tijoleira	0,70	0,02	1800,00	936,00
Cobertura exterior	Asfalto	0,30	0,10	1000,00	1000,00
	Isolante (EPS)	0,04	0,50	15,00	1400,00
	Betonilha	1,80	0,03	2000,00	1044,00
	Betão	2,00	0,10	2300,00	840,00
	Reboco	1,30	0,02	1800,00	820,00

Tabela 5 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos associados aos modelos unifamiliares.

Soluções construtivas		λ (W/(m.K))	R (m ² .K/W)	ρ (kg/m ³)	c (J/(kg.K))
Cobertura (esteira horizontal)	Betão	2,00	0,10	2300,00	840,00
	Reboco	1,30	0,02	1800,00	820,00
Cobertura inclinada	Telhas de barro	1,00	0,03	2000,00	800,00
	Revestimento	0,19	0,03	960,00	837,00
Pavimento em contacto com o solo	Enrocamento	0,70	0,39	1800,00	1000,80
	Betonilha	0,70	0,03	1450,00	1044,00
	Tijoleira	0,70	0,02	1800,00	936,00

Relativamente ao tipo de vidro mais utilizado em Portugal Continental concluiu-se, a partir do mesmo estudo, que mais de 70% dos alojamentos utilizavam vidros simples em todas as fachadas consideradas, sendo a solução de janela com dois panos de vidro e caixilharia com corte térmico, opção que reduz as perdas térmicas, ainda pouco utilizada (ver Figura 8).

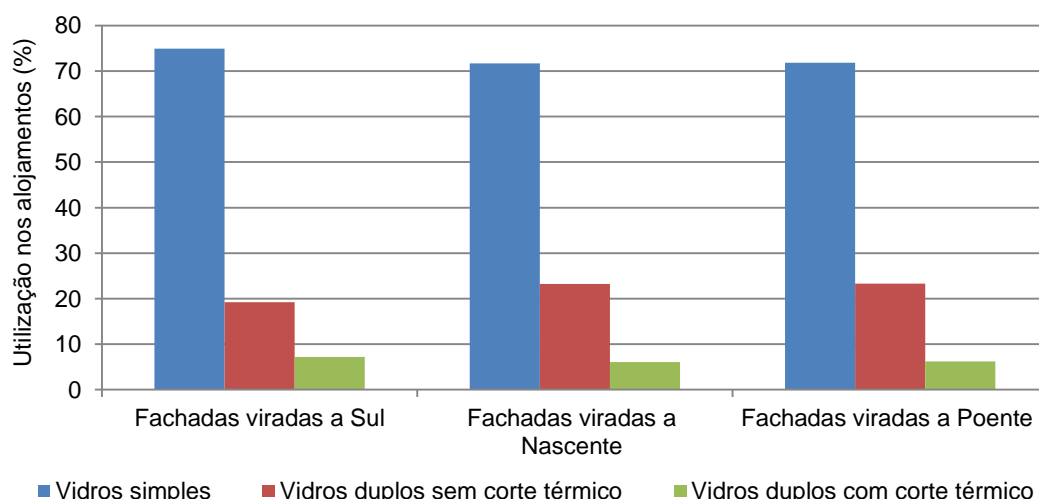


Figura 8 – Taxa de utilização de diferentes tipos de envidraçados em diferentes orientações (INE & DGEG 2011).

Para efeitos de construção dos modelos de base, considerou-se que todas as habitações, independentemente da tipologia, não teriam janelas na fachada orientada a norte e que as

restantes fachadas seriam constituídas por janelas simples com uma divisória horizontal e vertical e com caixilharia metálica.

Em relação à área média de vidros, segundo o Inquérito de 2010, para as fachadas orientadas a sul e a nascente, tomou o valor de 4,5 m²/alojamento enquanto para poente a área média de vidro situou-se próxima dos 4,3 m²/alojamento (INE & DGEG 2011). Estes valores são referentes apenas para os vidros simples, no entanto, para a construção dos modelos, considerou-se este parâmetro constante, alterando apenas a tipologia de vidro. As áreas médias de vidro utilizadas nos modelos foram de cerca de 4,5 m² para as fachadas orientadas a sul e a nascente e de 4,2 m² para as fachadas orientadas a poente.

Para os modelos desenvolvidos, optou-se por um vidro transparente comum com 6 mm de espessura. Nos casos em que se utilizou vidro duplo, considerou-se um espaçamento de 6 mm de ar entre os dois vidros com as mesmas propriedades térmicas (DesignBuilder Software Ltd 2010).

Tabela 6 – Propriedades térmicas dos vidros.

Soluções construtivas	e (m)	λ (W/(m.K))	U (W/(m ² .K))
Vidro simples	0,006	0,90	5,78
Vidro duplo	0,006	0,90	3,09
	0,006 (ar)	-	
	0,006	0,90	

Ao todo foram consideradas três situações distintas e exclusivas: vidros simples; vidros duplos sem corte térmico; vidros duplos com corte térmico.

Para efeito de sombreamento das janelas, consideraram-se persianas com alto nível de refletividade e baixa transmissividade exteriores à habitação. Estas seriam controladas pelo nível de radiação solar, de forma a serem ativadas sempre que a radiação solar ultrapasse os 300 W/m² (ISO 13790:2008 2008).

Foram desenvolvidos modelos considerando as duas situações: com sombreamento ou sem sombreamento das janelas.

3.2.4 Ganhos internos e condições de conforto

Para os ganhos internos, consideraram-se os ganhos introduzidos pelos ocupantes, equipamentos elétricos e sistemas de iluminação.

Normalmente, o período de ocupação das habitações restringe-se ao tempo fora do horário de trabalho. Ora, considerando um dia de trabalho com uma duração média de 9h, incluindo o tempo gasto pelo percurso entre a habitação e o local de trabalho e vice-versa, para efeitos de cálculo considerou-se que a utilização média de uma unidade de alojamento corresponderia a um período de 15 horas por dia (das 18h às 9h), cinco dias por semana. Nos restantes dois dias da semana (sábado e domingo), supôs-se que a habitação seria ocupada em tempo inteiro, ou seja 24h.

Relativamente aos equipamentos elétricos (televisão, rádio, computador entre outros), segundo o estudo efetuado em 2010, verificou-se que estes foram responsáveis por um consumo de eletricidade de cerca de 0,069 tep (802 kWh) no período de um ano. Para o cálculo da potência instalada considerou-se um período de utilização de 24 horas, originando uma potência de cerca de 92 W (INE & DGEG 2011).

O consumo de eletricidade por alojamento relacionado com a iluminação foi de 0,028 tep (326 kWh). Considerando um período de iluminação de 6h (18h às 24h), resulta numa potência de aproximadamente 149 W (INE & DGEG 2011).

Em termos de ganhos introduzidos por unidade de alojamento, conhecendo a área média por alojamento e tendo em consideração o período de funcionamento, tem-se então que os equipamentos elétricos apresentam ganhos de aproximadamente $0,79 \text{ W/m}^2$ e $0,95 \text{ W/m}^2$, para as tipologias de moradia e apartamento, respetivamente. Relativamente aos sistemas de iluminação, os ganhos são de cerca de $1,28 \text{ W/m}^2$ para a tipologia de moradia e de $1,55 \text{ W/m}^2$ para a tipologia de apartamento.

De acordo com o RCCTE, pode-se considerar como ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento para edifícios residenciais, 4 W/m^2 , numa base de 24 horas diárias. Sabendo isto é possível estimar o valor correspondente aos ganhos introduzidos pelas pessoas. Tendo em conta a área média para cada tipologia de habitação e o número médio de ocupantes, anteriormente referidos, os ganhos internos introduzidos pelas pessoas resultam em $85,1 \text{ W/pessoa}$ e $111,7 \text{ W/pessoa}$ para a tipologia de apartamento e moradia, respetivamente. Tendo em consideração estes resultados e os ganhos internos de referência de 120 W/pessoa , considerou-se adequado para o estudo a utilização do valor para os ganhos térmicos internos médios, presente no RCCTE (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006).

De forma a obedecer aos critérios estabelecidos pelo RCCTE considerou-se, para todos os casos de estudo e metodologias adotadas, temperaturas interiores de conforto de 20°C e 25°C para a estação de aquecimento e de arrefecimento, respetivamente. Foi ainda considerada como referência uma taxa de renovação do ar de 0,6 renovações por hora, com o fim de garantir a qualidade do ar interior (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006).

3.2.5 Sistemas de aquecimento e arrefecimento

Segundo o estudo do INE e DGEG em 2010, verificou-se que, dos alojamentos considerados, cerca de 78,3% utilizaram equipamentos para aquecimento do ambiente. De todos os equipamentos utilizados, o aquecedor elétrico independente, seja um radiador, termo-ventilador, etc., foi o mais popular, tendo sido utilizado por cerca de 61,2 % dos alojamentos considerados no estudo. Em oposição, o aquecedor a GPL independente foi o equipamento menos utilizado para o aquecimento do ambiente, usado apenas por 7,1 % dos alojamentos no período considerado. O número médio destes equipamentos por alojamento foi de aproximadamente 1,5 e 0,06, respetivamente (INE & DGEG 2011).

A Figura 9 apresenta os diferentes tipos de equipamentos utilizados para aquecimento do ambiente no período considerado no estudo.

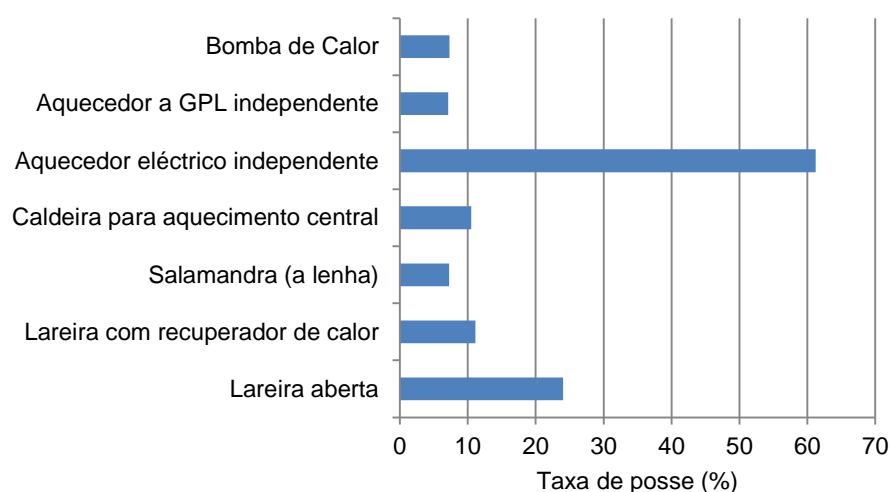


Figura 9 – Taxa de posse de equipamentos utilizados para aquecimento do ambiente (INE & DGEG 2011).

Relativamente ao período de funcionamento, verificou-se que a maioria destes equipamentos (cerca de 65 %) funcionou principalmente entre as 18h e as 8h (INE & DGEG 2011).

Quanto ao arrefecimento do ambiente, apenas 22,6 % dos alojamentos utilizaram equipamentos para esse fim. Dos três equipamentos utilizados (ventilador⁵, bomba de calor e o aparelho individual de ar condicionado), o ventilador é o que apresenta uma maior taxa de utilização nos alojamentos, correspondendo a aproximadamente 69,5 % (INE & DGEG 2011). Os restantes valores representativos da taxa de utilização nos alojamentos encontram-se representados na Figura 10.

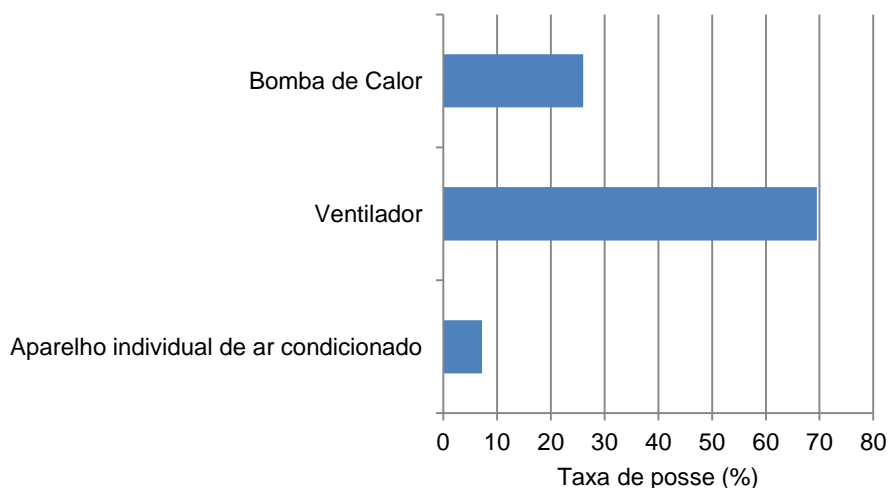


Figura 10 – Taxa de posse de equipamentos utilizados para arrefecimento do ambiente (INE & DGEG 2011).

A partir do estudo efetuado verificou-se que cerca de 55% dos equipamentos destinados a promover o arrefecimento do ambiente funcionaram entre as 18h e as 8h (INE & DGEG 2011).

A opção bomba de calor aparece como solução para aquecimento e arrefecimento, visto tratar-se de um aparelho de ar condicionado com a dupla função de aquecer e arrefecer. Este equipamento funciona como uma bomba de calor reversível, ou seja permite aquecer, funcionando como uma bomba de calor, e arrefecer, operando como uma máquina frigorífica.

É de notar que a taxa de posse dos equipamentos utilizados para aquecimento e arrefecimento tem em conta apenas aqueles que foram realmente utilizados, e não a totalidade dos equipamentos existentes. Por outras palavras, os equipamentos que se encontrem nas habitações mas que nunca tenham sido utilizados não foram considerados neste estudo. O mesmo é válido com os sistemas de iluminação e os equipamentos elétricos referidos anteriormente.

Em termos de construção dos modelos, para efeito de simulação e cálculo das necessidades de energia, assumiu-se uma eficiência de 100% para os sistemas de arrefecimento e aquecimento utilizados, que seriam somente alimentados por eletricidade da rede, no período compreendido entre as 18h e as 8h de segunda-feira a sexta-feira. Enquanto nos restantes dois dias funcionariam 24 horas, visto que ao sábado e domingo o alojamento seria ocupado durante todo o período (ver secção 3.2.4).

⁵ De notar que o ventilador não se trata efetivamente de um sistema de arrefecimento do meio ambiente. A sua principal função é a de promover a circulação forçada do ar, podendo ser utilizado no entanto para reduzir a sensação de desconforto térmico, tendo sido por essa razão considerado no inquérito.

Focando-se nas regiões da NUTS II, segundo a publicação de “*Indicadores de Conforto de 1997*”, a região de Lisboa era a que apresentava a maior taxa de posse de sistemas elétricos de aquecimento e de arrefecimento. Pelo contrário, a região Centro e a região Norte eram, respetivamente, as que apresentavam uma menor taxa de posse de sistemas de aquecimento e de arrefecimento (INE 1997).

A partir da taxa de posse de sistemas elétricos de aquecimento e arrefecimento, e sabendo aproximadamente como se encontram dispersos, atualmente, os alojamentos pelo país, foi possível estimar o número aproximado de alojamentos que utilizam esses sistemas por cada região.

Pela observação da Figura 11 verifica-se que, comparativamente com as restantes regiões, a região de Lisboa apresenta um maior número de alojamentos que possuem sistemas de aquecimento, seguida pela região do Porto. Por sua vez os sistemas elétricos de arrefecimento são menos comuns nas habitações portuguesas, sendo Bragança a região onde menos se utiliza estes tipos de equipamentos.

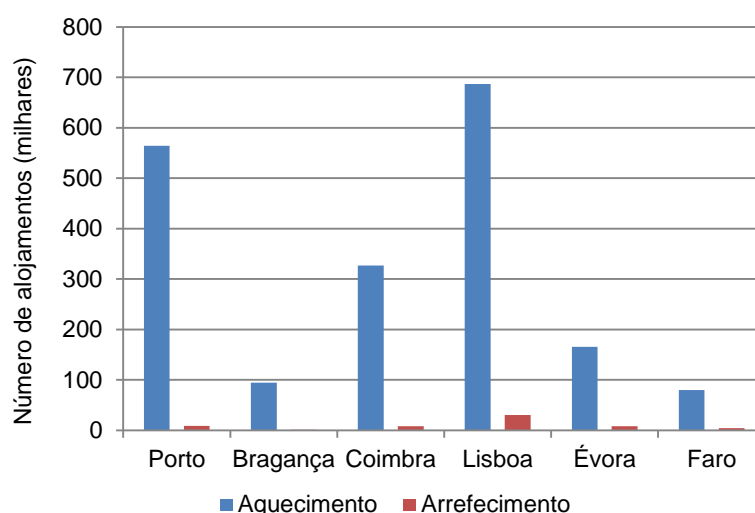


Figura 11 – Distribuição dos sistemas de climatização por região (INE 1997; INE & DGEG 2011).

Devido a falta de informação, não foi possível utilizar dados estatísticos mais recentes, no entanto, seria interessante, para um trabalho futuro, que fosse efetuada uma atualização deste trabalho com recurso a dados mais atuais.

3.3 Modelos desenvolvidos

Esta secção do trabalho tem como objetivo, apresentar diferentes modelos representativos do sector residencial em Portugal, desenvolvidos com base em estatísticas nacionais e em pressupostos admitidos anteriormente, tendo em consideração diferentes regiões climáticas e diferentes tipologias de habitação e de construção. No total foram desenvolvidos 72 modelos com o auxílio da ferramenta *DesignBuilder*.

Os modelos desenvolvidos diferem essencialmente em três pontos fundamentais. O esquema seguinte apresenta um resumo desses três pontos que foram já discutidos nas secções anteriores do trabalho.

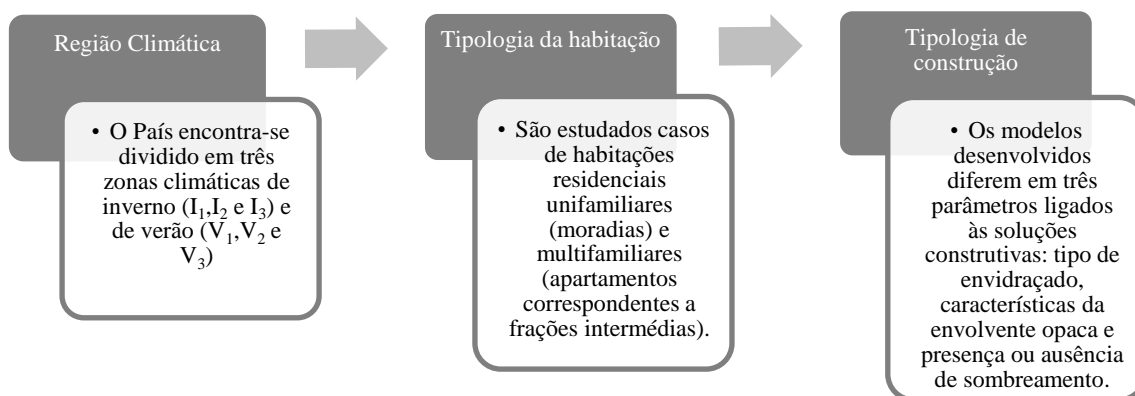


Figura 12 – Esquema representativo das diferenças que caracterizam os modelos em estudo.

A Figura 13 e Figura 14 representam os diferentes modelos construídos pelo *DesignBuilder*.

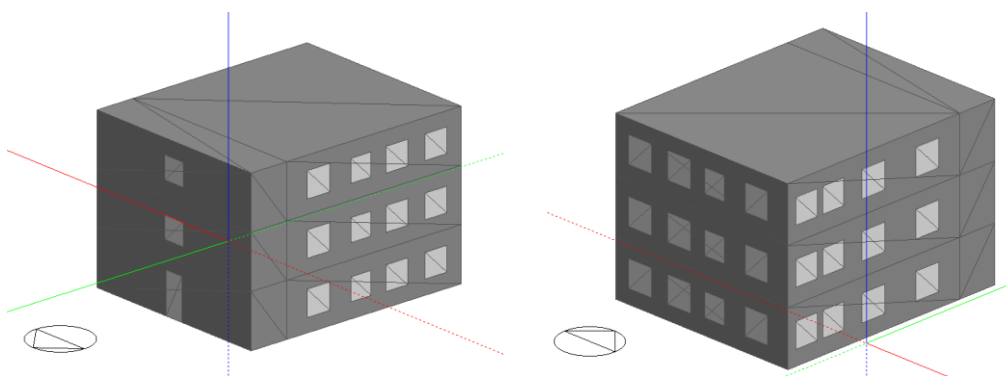


Figura 13 – Representação do edifício residencial multifamiliar, visto de NW e SE, respetivamente.

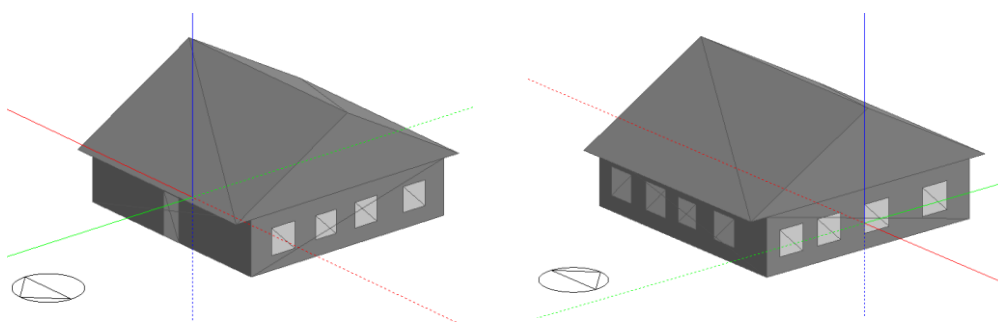
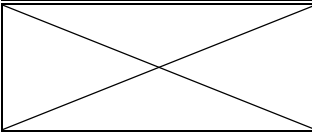


Figura 14 – Representação do edifício residencial unifamiliar, visto de NW e SE, respetivamente.

A Tabela 7 apresenta os diferentes casos considerados para cada região climática, tipologia de habitação e de construção.

Tabela 7 – Modelos desenvolvidos para cada região em estudo.

	Região climática					
	Bragança (I3)		Coimbra (I1)		Évora (I1)	
	Tipologia da habitação					
Tipologia de construção	Apartamento	Moradia	Apartamento	Moradia	Apartamento	Moradia
Vidros simples Envolvente s/ isolamento Janelas s/ sombreamento	caso 1	caso 7	caso 13	caso 19	caso 25	caso 31
Vidros simples Envolvente s/ isolamento Janelas c/ sombreamento	caso 2	caso 8	caso 14	caso 20	caso 26	caso 32
Vidros duplos s/ corte térmico Envolvente c/ isolamento Janelas s/ sombreamento	caso 3	caso 9	caso 15	caso 21	caso 27	caso 33
Vidros duplos s/ corte térmico Envolvente c/ isolamento Janelas c/ sombreamento	caso 4	caso 10	caso 16	caso 22	caso 28	caso 34
Vidros duplos c/ corte térmico Envolvente c/ isolamento Janelas s/ sombreamento	caso 5	caso 11	caso 17	caso 23	caso 29	caso 35
Vidros duplos c/ corte térmico Envolvente c/ isolamento Janelas c/ sombreamento	caso 6	caso 12	caso 18	caso 24	caso 30	caso 36
	Região climática					
	Faro (I1)		Lisboa (I1)		Porto (I2)	
	Tipologia da habitação					
Tipologia de construção	Apartamento	Moradia	Apartamento	Moradia	Apartamento	Moradia
Vidros simples Envolvente s/ isolamento Janelas s/ sombreamento	caso 37	caso 43	caso 49	caso 55	caso 61	caso 67
Vidros simples Envolvente s/ isolamento Janelas c/ sombreamento	caso 38	caso 44	caso 50	caso 56	caso 62	caso 68
Vidros duplos s/ corte térmico Envolvente c/ isolamento Janelas s/ sombreamento	caso 39	caso 45	caso 51	caso 57	caso 63	caso 69
Vidros duplos s/ corte térmico Envolvente c/ isolamento Janelas c/ sombreamento	caso 40	caso 46	caso 52	caso 58	caso 64	caso 70
Vidros duplos c/ corte térmico Envolvente c/ isolamento Janelas s/ sombreamento	caso 41	caso 47	caso 53	caso 59	caso 65	caso 71
Vidros duplos c/ corte térmico Envolvente c/ isolamento Janelas c/ sombreamento	caso 42	caso 48	caso 54	caso 60	caso 66	caso 72

3.4 Análise dos resultados de simulação

A partir da modelação foi possível estimar as necessidades de aquecimento e de arrefecimento para cada um dos diferentes casos enunciados anteriormente.

As figuras seguintes ilustram os resultados obtidos. Os gráficos diferem uns dos outros nas tipologias de habitação e nas necessidades energéticas, de aquecimento ou arrefecimento, encontrando-se em todos eles identificada cada região climática. Sendo assim, os modelos de construção aqui representados, que variam de 1 a 6, apenas se referem às diferenças nas soluções construtivas. Como tal, cada modelo difere dos outros da mesma forma que são distinguidos na Tabela 7, ou seja no modelo 1 considerou-se vidro simples e envolvente e janelas sem isolamento e sem sombreamento, respetivamente; no modelo 2, vidro simples, envolvente sem isolamento e janelas com sombreamento e assim sucessivamente.

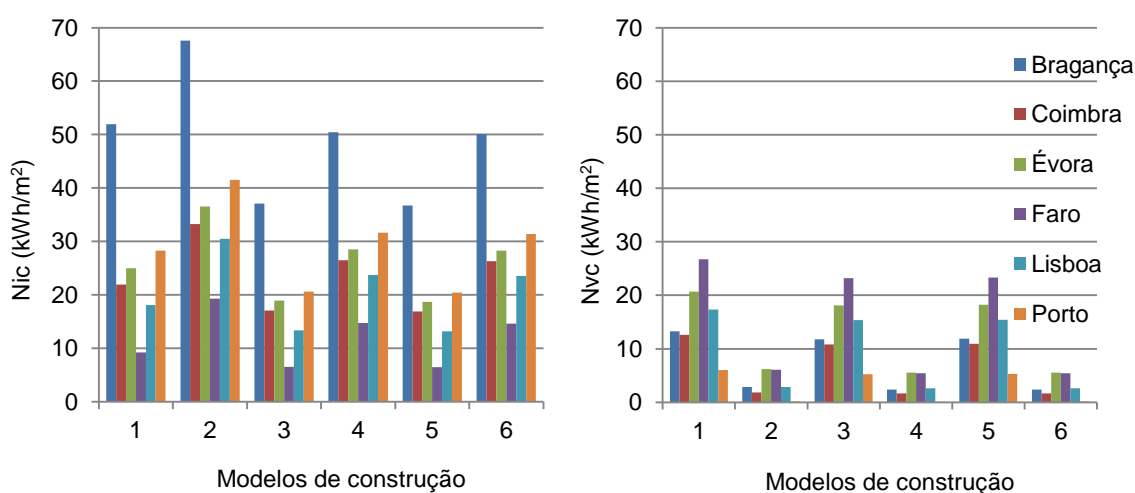


Figura 15 – Resultados da simulação para a tipologia de apartamento. A ilustração à esquerda representa as necessidades de energia para aquecimento, e à direita as necessidades de energia para arrefecimento.

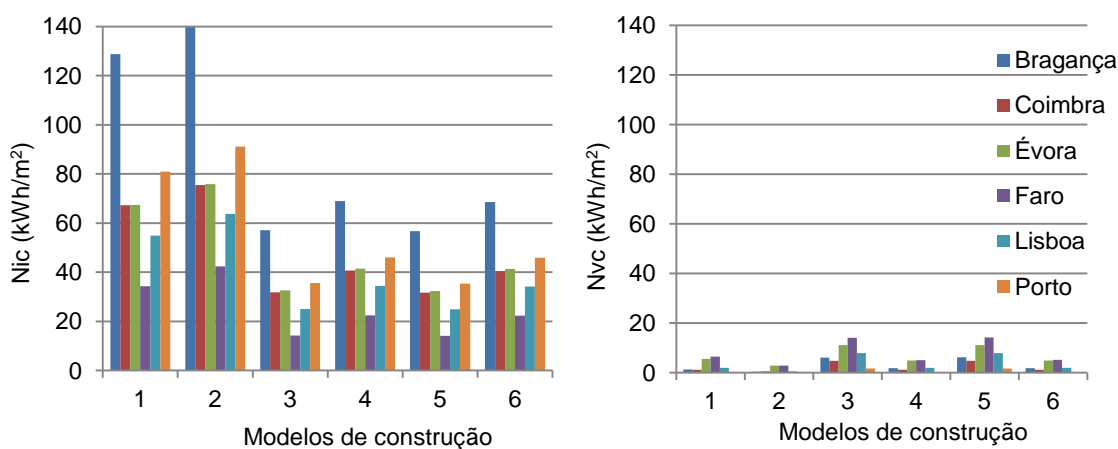


Figura 16 – Resultados da simulação para a tipologia de moradia. A ilustração à esquerda representa as necessidades de energia para aquecimento, e à direita as necessidades de energia para arrefecimento.

Este capítulo tem como principal objetivo a construção de modelos representativos do desempenho energético de uma habitação típica em Portugal. Pretende-se então estimar as necessidades de energia globais para o continente português, bem como os respetivos consumos elétricos, tendo em conta os perfis de utilização dos sistemas para aquecimento e arrefecimento.

Os resultados obtidos permitiram estimar as necessidades médias de aquecimento e de arrefecimento para uma habitação média, tendo em consideração o número de apartamentos e de moradias por região (ver capítulo 3.2).

Conhecendo então as necessidades de energia dos alojamentos, e sabendo ainda qual a taxa de posse de sistemas elétricos com esse fim para cada região em que este estudo incide (ver secção 3.2.5), foi então possível estimar os consumos elétricos nas habitações portuguesas representativas dessas regiões (ver Tabela 8).

Tabela 8 – Consumos elétricos para climatização no setor doméstico em Portugal.

Consumos elétricos (GWh)	Modelos de construção					
	1	2	3	4	5	6
Arrefecimento	48,81	10,58	59,80	14,07	60,13	14,11
Aquecimento	9700,84	11639,93	4860,59	6701,71	4825,14	6663,87

Perante os resultados obtidos e considerando que cerca de 80% dos casos representativos da situação portuguesa utilizam vidros simples e envolvente sem isolamento, sendo que os restantes 20% correspondem a casos em que se utilizam vidros duplos e envolvente com isolamento, procedeu-se à estimativa dos consumos elétricos por alojamento. Relativamente ao corte térmico, tendo em consideração que os consumos elétricos variam pouco significativamente com a utilização ou não deste nas situações de vidro duplo (modelos de construção 5 e 6 da Tabela 8), e sabendo ainda que a percentagem de alojamentos que utilizam esta solução é baixa relativamente às outras opções então, para efeitos de cálculo não se considerou este tipo de solução.

A estimativa dos consumos elétricos para climatização por alojamento tem em conta apenas as situações sem sombreamento nas janelas para o cálculo das necessidades para aquecimento e o contrário para o cálculo das necessidades para arrefecimento. Com o fim de aquecer o ambiente interior da habitação deve-se promover o melhor possível a entrada de ganhos solares, sendo que na estação de arrefecimento estes devem ser evitados, por exemplo com o auxílio de sistemas de sombreamento nos envidraçados, de forma a evitar o sobreaquecimento.

Tendo em conta os pressupostos assumidos ao longo das secções anteriores e tendo presente as estatísticas nacionais da habitação e energia no sector residencial mais recentes, procedeu-se ainda à comparação dos resultados obtidos a partir da metodologia enunciada ao longo deste capítulo com os resultados do inquérito nacional realizado pelo INE e a DGEG em 2010.

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos com os do inquérito nacional considerou-se, para os sistemas de aquecimento, uma eficiência nominal de 100%, valor de referência para resistências elétricas, e um EER⁶ de 3, considerando uma bomba de calor para arrefecimento (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006).

Os resultados finais encontram-se na Tabela 9, juntamente com os valores dos consumos elétricos por alojamento estimados no inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico de 2010 (INE & DGEG 2011).

⁶ EER (do inglês *Energy Efficiency Ratio*) corresponde à razão entre o valor da potência da unidade de arrefecimento e a potência elétrica consumida por essa unidade.

Tabela 9 – Consumos elétricos para climatização por alojamento segundo diferentes abordagens.

Consumos elétricos (kWh/alojamento)	Inquérito 2010	Abordagem “Top-down”
Arrefecimento	174,42	62,11
Aquecimento	418,60	4555,21

Tendo em conta os resultados obtidos, verifica-se que, no panorama nacional, o consumo de energia para aquecimento nas habitações é superior ao consumo de energia para arrefecimento.

A partir da observação da Figura 15 e Figura 16 repara-se nas principais diferenças obtidas a partir da simulação dos diversos casos para as tipologias de apartamento e moradia. Devido a uma maior área útil de pavimento para climatização e uma maior área de envolvente exterior as perdas de energia associadas à tipologia de moradia são superiores às do caso do apartamento. Estas perdas resultam em maiores necessidades de aquecimento nos meses de inverno e menores necessidades de arrefecimento nos meses mais quentes, comparativamente com a outra tipologia de habitação.

Apesar da diferença nas necessidades energéticas entre as duas tipologias de habitação, observa-se um perfil semelhante entre os gráficos correspondentes às necessidades de aquecimento e o mesmo entre os gráficos que representam as necessidades de arrefecimento. Como seria de esperar, a região de Faro apresenta-se, independentemente do modelo de construção e da tipologia de habitação, como a região onde as necessidades energéticas para aquecimento são mais baixas e as necessidades de arrefecimento são mais elevadas. Em oposição, uma habitação situada na região de Bragança, apresenta maiores necessidades energéticas na estação de aquecimento, seguida pela região do Porto, que em termos de arrefecimento é a região onde as necessidades energéticas são mais baixas.

Os modelos de construção mais eficientes energeticamente, e portanto que se traduzem em menores necessidades energéticas, são os mesmos para a tipologia de apartamento e moradia. A Tabela 8 permite uma melhor visualização da diferença entre consumos elétricos para climatização a nível nacional associados às diferentes opções de construção.

A opção de construção 2, ou seja, janela com sombreamento, vidro simples e envolvente exterior opaca sem isolamento mostra-se como a solução que resulta em menores necessidades energéticas para arrefecimento e como consequência, a que apresenta menores consumos elétricos associados. A opção de vidro simples e envolvente opaca sem isolamento, ao contrário das opções opostas, permite, na estação de arrefecimento, maiores perdas de calor associadas à maior quantidade de fluxo de calor a circular do interior para o exterior da habitação, possibilitando assim o arrefecimento do ambiente interior. A utilização de janelas com sombreamento dificulta a entrada dos ganhos solares, impedido o sobreaquecimento no interior da habitação.

Relativamente ao consumo de energia elétrica para aquecimento, observa-se que existem duas opções mais vantajosas a nível da poupança energética. A opção da utilização de janelas sem sombreamento e envolvente exterior opaca com isolamento, correspondente aos modelos de construção 3 e 5, permite reduzir as necessidades de aquecimento, no sentido em que possibilita a entrada de ganhos solares através dos envidraçados e promove a retenção do calor, dificultando a circulação de fluxo de calor do interior para o exterior da habitação. A solução do vidro duplo funciona também como uma barreira contra a saída de calor do interior da habitação, permitindo ainda atenuar a entrada de ganhos solares indesejados no verão. O modelo 5 difere do modelo 3 na opção de corte térmico que permite reduzir ainda mais as necessidades de aquecimento, sendo portanto este o melhor modelo para a redução do consumo elétrico para aquecimento.

Comparando os resultados obtidos pela abordagem utilizada neste trabalho com os resultados estimados pelo INE e a DGEG, verifica-se que existem diferenças tanto nos consumos elétricos

para arrefecimento como para o aquecimento. A partir da observação da Tabela 9 repara-se que, para o caso do arrefecimento, o valor obtido é inferior ao do inquérito, ao contrário do que acontece para o aquecimento. Neste último caso, o valor obtido seguindo a metodologia apresentada anteriormente é muito superior ao valor estimado pelo INE e a DGEG.

A discrepância observada para o consumo elétrico associado ao aquecimento pode estar relacionada com a suposição de que os equipamentos de aquecimento funcionariam 24h durante o fim de semana (ver secção 3.2.5). Outra suposição relacionada com os resultados consiste na consideração da área útil da habitação como área aquecida, sendo que normalmente apenas algumas divisões são sujeitas à ação dos sistemas de aquecimento.

Ao invés do que se verificou para o aquecimento, supõe-se que o horário de funcionamento dos sistemas de arrefecimento considerado na análise ficou aquém do considerado no inquérito, levando a crer que muitos dos inquiridos acionavam os equipamentos de arrefecimento durante um maior período de tempo que aquele que foi considerado pela maioria, ou que se utilizavam critérios de *set-point* inferiores aos 25°C.

Os resultados obtidos podem ainda ser explicados com o facto dos resultados apresentados no inquérito de 2010 corresponderem a todas as habitações de Portugal, ou seja continente mais ilhas, ao contrário do que foi considerado neste trabalho, onde apenas se estudou Portugal Continental.

4. Abordagem “*bottom-up*”

Esta secção do trabalho tem como objetivo estudar e caraterizar habitações nacionais “tipo” que sejam representativas do universo residencial do país.

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste capítulo baseou-se no projeto TABULA. Este projeto tem como objetivo, a criação de uma estrutura que envolva as diferentes tipologias dos edifícios europeus, principalmente os residenciais (TABULA Project Team 2010).

As tipologias foram desenvolvidas seguindo os seguintes passos:

1. Classificar as habitações existentes a nível nacional de acordo com a idade, dimensão, região ou zona climática, entre outros parâmetros;
2. Encontrar exemplos de habitações específicas, que representem os diferentes tipos de habitação característicos do país, de acordo com a classificação do ponto anterior;
3. Definir os diferentes sistemas de aquecimento e arrefecimento mais comuns e respetivos cálculos de performance energética quando aplicados às habitações “exemplo” do ponto anterior;
4. Determinar possíveis poupanças de energia;
5. Complementar as diferentes tipologias com dados estatísticos do sector residencial e dos sistemas de consumo energético.

4.1 Classificação dos alojamentos

Esta constitui a primeira etapa no desenvolvimento de tipologias de habitação para Portugal. Consiste em dividir diferentes tipos de habitação por períodos considerados marcantes a nível de mudanças nos materiais e princípios de construção, arquitetura, alterações nos regulamentos das propriedades térmicas, entre outros fatores que se considerem relevantes.

Para o caso português e para o desenvolvimento deste trabalho foram considerados três períodos que marcaram de forma significativa a maneira de construir habitações em Portugal (Bragança, de Almeida et al. 2007):

- Antes de 1960 – Período pós 2ª guerra mundial, marcado pela ditadura em Portugal. A nova constituição levou ao atraso no desenvolvimento industrial e tecnológico comparativamente com outros países da Europa Ocidental. Os anos 50 e 60 foram períodos de transição, marcados por estilos de arquitetura característicos, nomeadamente em edifícios públicos e sociais.
- Entre 1960 e 1990 – O início da Democracia, em 1974, marcou também o início da mudança na construção no País, principalmente em Lisboa e no Porto. Algumas dessas mudanças originaram construções de pobre qualidade e de arquitetura duvidosa. No entanto, em 1986, com a junção de Portugal à Comunidade Económica Europeia (CEE), muitos dos problemas económicos e sociais do País foram suavizados, dando espaço ao desenvolvimento e melhoramento do sector da construção.
- Após 1990 – Em 1990, foi publicado o primeiro documento legal dedicado à performance térmica dos edifícios em Portugal, com a sigla RCCTE. Este regulamento foi desenvolvido com o fim de melhorar a qualidade geral dos edifícios, assegurando melhores condições de conforto, através do controlo dos consumos de energia para aquecimento, arrefecimento e de iluminação. Uma nova versão do regulamento foi publicada em 2006, sendo um dos seus principais objetivos fomentar a evolução da performance energética das habitações e consequentemente, reduzir as emissões de gases prejudiciais ao ambiente.

4.2 Casos de estudo

Foram escolhidos diferentes casos representativos do tipo de construção praticado em Portugal, nos períodos enunciados.

O ideal seria desenvolver o conceito de habitação típica a nível nacional, no entanto, devido a condições climáticas distintas e diferentes princípios de construção e de aparência estrutural no País, tal não seria adequado. Como tal deveriam ser desenvolvidas tipologias separadas para cada região de Portugal.

Os casos de estudo considerados pertencem todos à região da grande Lisboa, no entanto foram também estudados assumindo que se encontravam implementados nas restantes regiões da NUTS II. Para cada região de Portugal Continental deveriam ser estudadas habitações características dessas mesmas zonas, no entanto a informação disponível apenas permitiu o estudo de edifícios existentes no distrito de Lisboa.

No total, foram analisadas nove habitações para cada região, entre edifícios unifamiliares, ou seja moradias, e multifamiliares, sendo estes divididos em apartamentos e apartamentos sociais. A divisão dos edifícios multifamiliares é justificada pela diferença, em termos de características construtivas e de desempenho energético, entre os apartamentos considerados “bons” para o período em que foram construídos e os apartamentos sociais, caracterizados por soluções construtivas menos eficazes a nível de eficiência energética.

Tabela 10 – Apresentação dos casos de estudo analisados segundo a abordagem “bottom-up” (fonte: Google Earth).

Período de construção	Tipologia de habitação		
	Moradia	Apartamento social	Apartamento
Até 1960	 (Alvalade)	 (Olivais Norte)	 (Praça de Londres)
De 1960 a 1990	 (Olivais)	 (Chelas)	 (R. José de Melo e Castro)
Após 1990	 (Santa Cruz Benfica) ⁱⁱ	 (Av. Cidade de Luanda)	 (Av. Estados Unidos da América)

ⁱⁱ De notar que esta moradia foi totalmente recuperada, e como tal, equivale a um edifício novo.

4.2.1 Descrição dos casos de estudo

- Período anterior a 1960:

A moradia de três pisos considerada para este período de construção era, originalmente, caracterizada pela tipologia T2, tendo dois quartos e uma sala. A habitação sofreu algumas modificações nos anos seguintes, sendo que inicialmente, o piso superior servia como um sótão não habitado, tendo sido posteriormente convertido num espaço útil.

A residência unifamiliar apresenta apenas duas fachadas em contacto com o exterior, fachadas orientadas a este e oeste, e outras duas em contacto com edifícios adjacentes. Na construção inicial, a habitação dispunha de uma varanda orientada a nascente, que atualmente se encontra fechada, foi ainda acrescentado espaço útil à casa na orientação oposta. No entanto, este estudo incide sobre a construção inicial, como tal foram considerados os aspetos construtivos originais para todos os casos de estudo.

Em termos de sombreamento causado por obstáculos alheios à habitação, verificou-se que a fachada orientada a poente é a mais penalizada na estação de aquecimento, visto que se encontra direcionada para um edifício de nove pisos. A outra fachada que se encontra em contacto com o exterior, por sua vez não é tão sombreada tendo em conta que se encontra orientada para uma habitação de dimensões semelhantes ao caso de estudo.

Construído em 1965⁷, o apartamento social estudado (Olivais Norte) encontra-se inserido num edifício de 4 pisos. A fração autónoma situa-se no segundo piso do edifício, correspondendo à tipologia T3. Em termos de envolvente exterior, o apartamento é caracterizado por ter as fachadas principais orientadas a nascente, poente e a sul. Na fachada orientada a poente, foi considerado que a varanda não se encontra fechada, de forma a obedecer ao projeto inicial. A parede em contacto com a caixa de escadas, orientada a norte, é considerada como envolvente exterior, visto que se encontra em contacto com um espaço exterior ao edifício.

Devido à presença da varanda em todas as frações autónomas do edifício, nota-se que o efeito de sombreamento é bastante significativo na fachada orientada a poente, bem como o sombreamento no horizonte. O mesmo se passa com um dos vãos envidraçados orientados a sul, que dá ligação para a mesma varanda.

O apartamento estudado (Praça de Londres) era originalmente constituído por três quartos e uma sala (T3). Localiza-se no segundo piso de um edifício, projetado em 1952, composto por seis andares mais rés-do-chão.

A habitação possui três fachadas em contacto com o exterior, estando parte da fachada orientada a poente em contacto com um edifício adjacente e a fachada orientada a nascente em contacto com caixa de escadas/elevador, corredor de ligação entre apartamentos e com outro apartamento pertencente ao mesmo edifício.

Relativamente ao efeito de sombreamento, é de notar a presença de um edifício adjacente de dimensões semelhantes ao edifício em que se encontra inserida a fração autónoma em estudo, responsável por ângulos de sombreamento significativos (superiores a 45°) sobre os vãos envidraçados direcionados a oeste. A presença de varandas na fachada a sul é também causadora de sombreamento nos vãos envidraçados.

⁷ Este caso de estudo pertence à década de 60, no entanto foi considerado para o período de construção anterior a 1960 visto ser o caso de apartamento social que mais se aproxima desse período, cujas características geométricas e térmicas são conhecidas

- Período entre 1960 e 1990:

Construída em 1964, a moradia em estudo, de tipologia T5, é constituída por dois pisos úteis e um sótão não habitado. Em termos de envolvente, a habitação apresenta três fachadas em contacto com o exterior, fachada sudoeste, sudeste e noroeste, estando apenas a fachada nordeste em contacto com outra habitação independente e semelhante, em termos de dimensões, à moradia em estudo.

Relativamente ao espaço que rodeia a habitação, é de notar que, devido à proximidade de outra moradia, apenas a fachada sudoeste é significativamente sombreada. Considerou-se que, apesar da presença de vegetação, as restantes fachadas em contacto com o exterior não possuem obstáculos significativos à radiação solar incidente na habitação. A vegetação foi desprezada, visto que não é um fator causador de sombreamento permanente, no sentido em que pode ser removido consoante a vontade dos ocupantes da habitação, nem constante, visto que, dependendo do tipo de vegetação, pode causar sombreamento apenas nalgumas alturas do ano.

Inserido num edifício de 5 pisos, o apartamento social de tipologia T3 estudado (Chelas) encontra-se orientado a nascente, com a fachada sudeste e nordeste em contacto com o exterior. Parte da fachada orientada a sudoeste, bem como toda a fachada orientada a noroeste, encontra-se em contacto com outro alojamento, também pertencente ao edifício multifamiliar. Uma menor área da parede orientada a sudoeste encontra-se em contacto com um espaço de circulação interior, com a finalidade de promover a ligação entre os diferentes alojamentos inseridos no mesmo edifício. É de notar que se encontra uma janela orientada para esse espaço, constituindo então um envidraçado de envolvente interior.

A presença de uma varanda na vertente sudeste do apartamento provoca sombreamento a um dos envidraçados orientados nessa direção. Em termos de sombreamento no horizonte, entendeu-se que, apesar de se encontrar num dos pisos mais baixos e de estar inserido num lote de edifícios semelhantes, a envolvente do edifício não apresenta obstáculos que promovam sombreamento significativo.

O alojamento do edifício multifamiliar não social (R. José de Melo e Castro), correspondente a este período de construção, trata-se de um T3 inserido num dos pisos superiores do edifício.

A fração autónoma em estudo é caracterizada por possuir toda a fachada orientada a este e oeste em contacto com o exterior, bem como parte da fachada orientada a norte. A fachada orientada a este é coberta por uma área de envidraçado superior à da fachada orientada a oeste, devido essencialmente à presença de duas varandas orientadas a nascente. Por sua vez a outra fachada em contacto com o exterior não engloba envidraçados, encontrando-se a restante parte dessa fachada em contacto com outra fração autónoma.

A parede do apartamento orientada a sul dá acesso a um espaço de circulação comum aos inquilinos do edifício residencial multifamiliar e encontra-se em contacto ainda com o vão de escadas e com a caixa de elevador bem como com outro alojamento pertencente ao mesmo piso do mesmo edifício.

Em termos de sombreamento, verificou-se que, por o apartamento se encontrar a uma altitude mais elevada que os restantes edifícios presentes nas proximidades, não teria efeito na perspetiva do horizonte. No entanto, o efeito de sombreamento é significativo nos envidraçados orientados a nascente devido às varandas. Estas promovem o aumento dos ângulos de sombreamento por efeito da pala vertical esquerda, direita e pala horizontal.

- Período após 1990:

Das moradias estudadas, a que corresponde a este período de construção é a que apresenta um maior número de pisos úteis, em que tanto a cave como uma parte do sótão foram considerados como espaços úteis, e como consequência é caracterizada por uma área útil de pavimento superior. Detentora de quatro pisos úteis, esta moradia originária de 1995, corresponde a um T5.

A moradia em estudo é constituída por três fachadas em contacto com o exterior e uma quarta em contacto com outra habitação semelhante.

A envolvente exterior da habitação é caracterizada por possuir envidraçados de diferentes tipos e dimensões. Estes por sua vez sofrem fraco sombreamento resultante de obstáculos no horizonte, sendo a exceção um dos envidraçados presentes na fachada sul da cave que é fortemente sombreada, apresentando ângulos de sombreamento iguais ou superiores a 45°, não só no horizonte como também em todo o seu redor. Alguns dos outros envidraçados a sul apresentam também sombreamento significativo, ângulos de sombreamento superior a 20°, resultantes das palas horizontais e verticais.

Relativamente ao caso de estudo da habitação social (Av. Cidade de Luanda) correspondente a este período de construção, este encontra-se num edifício multifamiliar constituído por nove pisos com diferentes tipologias. O apartamento em questão é de tipologia T3 e encontra-se no segundo piso do edifício residencial multifamiliar.

O alojamento é constituído por duas fachadas em contacto com o exterior, orientadas a nascente e a sul, sendo caracterizadas por fraco sombreamento causado por obstáculos no horizonte. A poente, a habitação encontra-se em contacto com outro alojamento pertencente ao mesmo edifício multifamiliar, com o corredor de ligação entre alojamentos e também com o elevador. A norte, a parede interior do apartamento em estudo separa outro alojamento independente.

Alguns dos envidraçados orientados a sul e este sofrem efeito de sombreamento causado pelas próprias paredes da habitação que são mais recuadas nalgumas divisões.

O apartamento construído na década de 90 (Av. Estados Unidos da América) consiste num T2 situado no penúltimo piso de um edifício multifamiliar constituído por 7 pisos.

A habitação em causa é caracterizada por possuir envidraçados de envolvente exterior orientados a nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste. Parte da parede orientada a sudeste encontra-se em contacto com outro alojamento pertencente ao mesmo edifício multifamiliar e com o espaço de circulação comum dos inquilinos bem como o vão de escadas que promove a ligação entre andares. Uma grande área da fachada oposta encontra-se, por sua vez, associada a outra habitação pertencente a um edifício multifamiliar adjacente de características semelhantes ao do edifício em estudo.

Visto tratar-se de uma habitação num piso superior, os envidraçados não sofrem sombreamento significativo, resultante da presença de obstáculos no horizonte. Tanto a nordeste como a noroeste o ângulo de sombreamento é nulo, no entanto, nas orientações opostas considerou-se um ângulo de sombreamento de 20° devido à proximidade de um bloco de apartamentos idênticos aos do caso de estudo.

A presença de varandas nas vertentes opostas do apartamento são também causadoras de sombreamento nos envidraçados, reduzindo assim a exposição solar. Outros fatores de sombreamento significativos, responsáveis por ângulos de sombreamento superiores a 42°, são as fachadas mais salientes dos alojamentos adjacentes ao caso de estudo.

4.2.2 Caracterização dos casos de estudo

Para cada uma das décadas, as diferentes habitações foram caracterizadas em termos geométricos e térmicos, com o objetivo de estimar as respetivas necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento. Para esse fim foram levantados os seguintes dados:

- Geométricos: pé direito médio, área útil de pavimento, área de envidraçados e área de paredes exteriores por orientação. Nalguns casos foi ainda necessário determinar a área de coberturas e pavimentos exteriores e a área da envolvente em contacto com espaços não úteis, entre outros;
- Térmicos: coeficientes de transmissão térmica para paredes, coberturas e pavimentos exteriores e, nalguns casos, coeficientes de transmissão térmica da envolvente em

contacto com espaços não úteis. Relativamente aos vãos envidraçados indicam-se os coeficientes de transmissão térmica médio dia-noite, devido à presença de proteções solares exteriores ou interiores, e os fatores solares do vidro sem e com dispositivos de proteção solar.

A Tabela 11 e Tabela 12 apresentam alguns dados referentes à caracterização geométrica dos diferentes casos de estudo para cada intervalo de tempo considerado (Gonçalves, Camelo et al. 2005).

Tabela 11 – Caracterização geométrica: área de paredes e vãos envidraçados.

Período de construção	Tipologia	A_{ext} (m ²)								
		Envolvente exterior	N	S	E	W	SE	SW	NE	NW
Até 1960	Moradia (T2)	Paredes exteriores	-	-	13,48	15,73	-	-	-	-
		Vãos envidraçados	-	-	6,07	3,28	-	-	-	-
	Apartamento Social (T3)	Paredes exteriores	3,64	24,74	16,57	14,95	-	1,00	-	-
		Vãos envidraçados	-	4,16	5,45	2,12	0,45	-	-	-
	Apartamento (T3)	Paredes exteriores	15,87	16,29	-	18,68	-	-	-	-
		Vãos envidraçados	8,21	7,38	-	2,60	-	-	-	-
De 1960 a 1990	Moradia (T5)	Paredes exteriores	-	-	-	-	29,85	45,70	-	31,10
		Vãos envidraçados	-	-	-	-	10,03	0,80	-	8,78
	Apartamento Social (T3)	Paredes exteriores	-	15,41	18,06	-	-	-	-	-
		Vãos envidraçados	-	1,19	3,30	-	-	-	-	-
	Apartamento (T3)	Paredes exteriores	3,36	-	13,63	19,68	-	-	-	-
		Vãos envidraçados	-	-	11,32	6,00	-	-	-	-
Após 1990	Moradia (T5)	Paredes exteriores	33,37	29,55	5,12	73,62	-	-	-	-
		Vãos envidraçados	20,25	6,48	-	3,55	-	-	-	-
	Apartamento Social (T3)	Paredes exteriores	-	20,98	18,90	-	-	-	-	-
		Vãos envidraçados	-	3,78	6,48	-	-	-	-	-
	Apartamento (T3)	Paredes exteriores	-	-	-	-	9,83	16,44	16,54	9,98
		Vãos envidraçados	-	-	-	-	2,77	5,61	5,51	2,77

Relativamente à ventilação, considerou-se, para todos os casos de estudo, que esta se processa de igual forma em todas as frações e sem auxílio de sistemas mecânicos. A taxa de renovação do ar (R_{ph}) é determinada em função do tipo de edifício, da permeabilidade da envolvente ao ar e da sua exposição ao vento. O tipo de caixilharia e a sua permeabilidade ao ar também interferem nos valores convencionais de R_{ph} (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006).

Nos casos de estudo consideraram-se caixilharias sem classificação relativamente à permeabilidade ao ar, resultando nos valores convencionais, para a taxa de renovação, apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Dados relativos à ventilação e caracterização geométrica

Período de construção	Tipologia	R_{ph} (h ⁻¹)	P_d (m)	A_p (m ²)
Até 1960	Moradia (T2)	0,90	2,85	68,39
	Apartamento Social (T3)	1,10	2,51	63,58
	Apartamento (T3)	1,10	2,80	108,49
De 1960 a 1990	Moradia (T5)	0,95	2,50	176,00
	Apartamento Social (T3)	0,99	2,41	60,84
	Apartamento (T3)	1,13	2,80	94,28
Após 1990	Moradia (T5)	0,95	2,30	233,10
	Apartamento Social (T3)	0,95	2,70	71,74
	Apartamento (T3)	1,10	2,91	109,17

Na tabela seguinte encontra-se a descrição dos componentes referentes às paredes exteriores e coberturas interiores e exteriores e respetivos valores dos coeficientes de transmissão térmica obtidos tendo em conta valores tabelados (Gonçalves, Camelo et al. 2005; Santos & Matias 2009; Santos & Rodrigues 2009).

Tabela 13 – Caracterização térmica: paredes e coberturas.

Período de construção	Tipologia	Paredes exteriores		Coberturas		
		Constituição	U (W/(m ² .K))	Constituição	U_{ascen} (W/(m ² .K))	U_{descen} (W/(m ² .K))
Até 1960	Moradia (T2)	Simples tijolo de alvenaria composta (34 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,58	Madeira sem forro (20cm) + reboco (1,5 cm)	2,21	-
	Apartamento Social (T3)	Simples tijolo (24 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,33	-	-	-
	Apartamento (T3)	Dupla tijolo (11 e 15 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	0,97	-	-	-
De 1960 a 1990	Moradia (T5)	Simples tijolo (25 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,33	Laje de betão (15 cm) + reboco (1,5 cm)	2,43	-
				Laje de betão (20 cm) + reboco (1,5 cm) + acabamento (3 cm)	1,81	1,61
	Apartamento Social (T3)	Dupla tijolo (11 e 7 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,53	-	-	-
	Apartamento (T3)	Dupla tijolo (11 e 11 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,10	-	-	-
		Simples tijolo (11 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	2,16			
Após 1990	Moradia (T5)	Dupla tijolo (15 e 11 cm) + isolante ⁱⁱⁱ (4 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	0,49	Bloco cerâmico (18 cm) + isolante ⁱⁱⁱ (2 cm) + reboco (1,5 cm)	0,93	-
				Blocos cerâmicos (18 cm) + isolante ^{iv} (2 cm) + reboco (1,5 cm) + telha (1 cm)	0,97	0,90
	Apartamento Social (T3)	Dupla tijolo (15 e 11 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	0,97	-	-	-
	Apartamento (T3)	Dupla tijolo com caixa de ar (25 cm) + isolante ^v (4 cm) + reboco (1,5 cm)	0,53	-	-	-

ⁱⁱⁱ Aglomerado negro de cortiça.

^{iv} Aglomerado de cortiça.

^v Poliestireno extrudido.

Relativamente aos vãos envidraçados, encontram-se apresentados, na Tabela 14, os valores dos coeficientes de transmissão térmica médios dia-noite, tendo em conta as proteções solares dos vãos envidraçados. Foram considerados valores tabelados que melhor representavam as características dos vãos envidraçados para cada habitação (Santos & Matias 2009).

Tabela 14 – Caracterização térmica: vãos envidraçados.

Período de construção	Tipologia	Vãos envidraçados		
		Constituição	U (W/(m ² .K))	$g \pm 100$
Até 1960	Moradia (T2)	Vidro simples + portadas interiores + caixilho de madeira	3,40	0,40
	Apartamento Social (T3)	Vidro simples + estores exteriores + caixilho de madeira com quadrículas	3,40	0,07
	Apartamento (T3)	Vidro simples + estores exteriores + caixilho de madeira	3,40	0,07
De 1960 a 1990	Moradia (T5)	Vidro simples + estores exteriores + caixilho de madeira	3,40	0,07
		Vidro simples + cortina interior + caixilho de madeira	4,30	0,33
	Apartamento Social (T3)	Vidro simples + estores exteriores + caixilho de madeira	3,40	0,07
		Vidro simples + cortina interior + caixilho de madeira	4,30	0,33
	Apartamento (T3)	Janela de correr com vidro simples + estores exteriores + caixilho de alumínio	4,10	0,07
		Janela de correr com vidro simples + caixilho de alumínio	6,50	0,33
Após 1990	Moradia (T5)	Vidro duplo + persianas exteriores + caixilho de madeira com quadrículas	2,50	0,04
		Vidro duplo + cortina interior + caixilho de madeira	2,90	0,37
		Janela de correr com vidro duplo + persianas exteriores + caixilho de alumínio	3,10	0,04
		Janela fixa com vidro duplo + persianas exteriores + caixilho de alumínio	2,80	0,04
		Janela de correr com vidro duplo + cortina interior + caixilho de alumínio	3,90	0,37
	Apartamento Social (T3)	Vidro simples + estores exteriores + caixilho de madeira	3,90	0,07
	Apartamento (T3)	Vidro duplo com corte térmico + estores exteriores + caixilho em alumínio	2,70	0,04

Os fatores solares dos vãos com proteção solar ativa a 100% dependem do tipo de vidro (duplo ou simples), do tipo de proteção solar e respetiva cor. Estes valores encontram-se tabelados para as situações mais comuns no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006).

4.3 Sistemas de aquecimento e arrefecimento

Considerou-se que as necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento seriam inteiramente satisfeitas por eletricidade da rede, também consideradas nos modelos anteriormente desenvolvidos.

4.4 Análise energética dos casos de estudo

Nesta fase do trabalho, procedeu-se à análise do desempenho energético das habitações em estudo, tendo como base o método de cálculo nacional. Para tal, recorreu-se a uma ferramenta de cálculo de aplicação do RCCTE desenvolvida pelo Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências de Construção (ITeCons) (ITeCons 2006).

Os casos de estudo foram analisados a partir de diferentes abordagens baseadas no RCCTE com diferentes valores dos coeficientes de transmissão térmica. Assim, com base no RCCTE de 2006 foram feitos dois estudos, um com as soluções construtivas originais, e um segundo substituindo as soluções originais por soluções correspondentes aos valores dos coeficientes de transmissão térmica de referência de 2006. Por outro lado, com base na futura metodologia de cálculo do RCCTE, aplicou-se, para os mesmos casos de estudo, soluções construtivas com valores dos coeficientes de transmissão térmica de referência preconizados na metodologia em desenvolvimento.

Através da utilização das duas metodologias pretende-se avaliar se a nova metodologia do regulamento térmico impulsiona Portugal para a meta Europeia constante na Diretiva 2010/31/EU, em consonância com o conceito de edifícios de baixo consumo de energia.

Seguidamente são explicadas as diferentes abordagens utilizadas.

4.4.1 Casos com soluções construtivas originais

A metodologia utilizada na análise energética dos casos de estudo é a que se encontra descrita no RCCTE, sendo que neste caso, teve-se em consideração os materiais de construção característicos dos mesmos. Sendo assim, a diferença fundamental entre esta metodologia e aquela que se irá considerar na fase 4.4.3 reflete-se nos valores dos coeficientes de transmissão térmica correspondentes aos vãos envidraçados e aos elementos opacos da envolvente exterior e interior.

4.4.2 Casos com aplicação da nova metodologia

Para além do procedimento de cálculo, a metodologia em vigor e a nova diferem principalmente nos valores dos coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e vãos envidraçados e dos coeficientes de transmissão térmica lineares de referência (ver Anexo A).

Com a implementação do novo regulamento térmico é expectável que se verifiquem algumas alterações nos dados climáticos e outros parâmetros utilizados nos cálculos. No entanto, para efeitos de cálculo e por desconhecimento das alterações finais, foram utilizados os valores estabelecidos pelo RCCTE de 2006.

De acordo com a futura metodologia, os valores limites das necessidades nominais de energia útil para aquecimento (N_i) das frações autónomas estudadas resultam da soma de três parcelas, sendo elas representadas na seguinte equação:

$$N_i = \frac{(Q_t + Q_v - Q_{gu})}{A_p} \quad (6)$$

onde Q_t representa as perdas de calor por condução através da envolvente, Q_v as perdas de calor resultantes da renovação de ar e Q_{gu} os ganhos de calor úteis, todos com unidades kWh. A_p corresponde à área útil de pavimento da habitação, em m².

As perdas de calor por condução através da envolvente durante a estação de aquecimento podem ser estimadas considerando as perdas pelos envidraçados, paredes, coberturas e pavimentos. Estas perdas ocorrem devido à diferença de temperatura entre o interior e o exterior da fração estudada.

$$Q_t = Q_{ext} + Q_{lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \quad (7)$$

Em que Q_{ext} representa as perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados, pavimentos e coberturas em contacto com o exterior, Q_{lna} as perdas de calor por elementos em contacto com locais não aquecidos, Q_{pe} as perdas de calor pelos elementos em contacto com o solo e Q_{pt} as perdas de calor pelas pontes térmicas lineares do edifício. Todas as parcelas apresentam-se com unidades em kWh.

Durante a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar estas perdas é, para cada elemento em contacto com o exterior ou com um local não aquecido, calculada pelas seguintes expressões, respetivamente:

$$Q_{ext} = 0,024 \times U \times A \times GD \quad (8)$$

e

$$Q_{lna} = 0,024 \times U \times A \times GD \times \tau \quad (9)$$

onde U é o coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente, com unidades W/(m².K), A corresponde à área do elemento da envolvente, em m² e GD é o número de graus-dias, que depende de cada região. O coeficiente τ depende do tipo de espaço não útil e da razão entre a área do elemento que separa o espaço útil interior do espaço não útil e a área do elemento que separa o espaço não útil do ambiente exterior. Os valores possíveis que este coeficiente pode tomar encontram-se tabelados no Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos edifícios aprovado pelo Decreto-Lei n.º 80/2006.

No caso de elementos em contacto com o solo e das pontes térmicas lineares, a energia necessária para compensar as perdas é, para cada elemento ou ponte térmica, dada pelas seguintes expressões, respetivamente:

$$Q_{pe} = 0,024 \times L_{pe} \times GD \quad (10)$$

e

$$Q_{pt} = 0,024 \times L_{pt} \times GD \quad (11)$$

onde L_{pe} e L_{pt} representam, respetivamente, as perdas unitárias de calor através dos elementos em contacto com o solo e através das pontes térmicas lineares. Estas têm unidades W/K, e podem ser calculadas pela seguinte expressão:

$$L_{pe} = L_{pt} = \sum_l \psi_l \times B_l \quad (12)$$

em que ψ_l é o coeficiente de transmissão térmica linear do elemento ou ponte térmica l , em W/(m.K) e B_l corresponde ao perímetro do elemento l medido pelo interior, no caso de elementos em contacto com o solo, ou corresponde ao desenvolvimento linear da ponte térmica l também medido pelo interior, em metros.

A expressão (10) apenas é válida para o RCCTE de 2006, visto que a futura metodologia considera valores do coeficiente de transmissão térmica para elementos em contacto com o solo. Sendo assim, segundo a nova metodologia, a energia necessária para compensar as perdas de calor por elementos em contacto com o solo é calculada por uma expressão idêntica a (8).

Relativamente às perdas resultantes da renovação do ar, a energia necessária para compensar essas perdas pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Q_v = 0,024 \times GD \times H_{ve} \quad (13)$$

onde GD é o número de graus-dias e H_{ve} representa as perdas associadas à renovação de ar, em W/K, e é dado por:

$$H_{ve} = (0,34 \times R_{ph} \times A_p \times P_d) \quad (14)$$

onde R_{ph} corresponde ao número de renovações por hora do ar interior, A_p representa a área útil de pavimento, em m² e P_d o pé-direito médio, em m.

No caso da utilização de sistemas mecânicos de ventilação, deve ser considerada na expressão (13) a energia elétrica que seria necessária para o seu funcionamento. No entanto, tendo em conta que os casos de estudo apenas dispõem de ventilação natural, tal não é considerado.

Os ganhos de calor úteis são resultantes dos ganhos solares, da iluminação, dos equipamentos utilizados na habitação, e ainda dos ocupantes desta. Os ganhos úteis (Q_{gu}) podem ser calculados a partir da conversão dos ganhos térmicos brutos (Q_g), através de um fator de utilização dos ganhos térmicos (η) que se considera igual a 1. A expressão seguinte traduz esta relação:

$$Q_{gu} = \eta \times Q_g \quad (15)$$

Os ganhos térmicos brutos resultam do somatório entre os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor e os associados ao aproveitamento da radiação solar. Tendo em conta que se pretende calcular os valores limites das necessidades nominais de energia útil para aquecimento,

os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar que atravessa os envidraçados são desprezados. Relativamente aos ganhos térmicos de fontes internas (Q_i), estes podem ser calculados de acordo com a equação seguinte:

$$Q_i = q_i \times M \times A_p \times 0,72 \quad (16)$$

onde q_i corresponde aos ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento, que neste caso toma o valor de 4 W/m^2 , visto todos os casos de estudo se tratarem de edifícios residenciais (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006). M representa a duração média da estação convencional de aquecimento, em meses e A_p é a área útil de pavimento, em m^2 .

As necessidades nominais de aquecimento (N_{ic}), isto é, a energia útil que é necessário fornecer a uma fração autónoma de forma a manter a temperatura interior de conforto de referência, são calculadas seguindo uma metodologia semelhante à utilizada para o cálculo dos valores limites das necessidades nominais de energia útil para aquecimento. A principal diferença prende-se com o facto de se considerar, para o cálculo do N_{ic} , os ganhos solares que foram desprezados anteriormente. Sendo assim, neste caso os ganhos térmicos brutos serão dados pela soma dos ganhos térmicos de fontes internas (ver expressão (16)) com os ganhos solares, dados por:

$$Q_s = G_{sul} \times \sum_j \left[X_j \times \sum_n A_{s,inj} \right] \times M \quad (17)$$

em que G_{sul} corresponde ao valor médio mensal da energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento, de unidades $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{mês})$, X_j é o fator de orientação para as diferentes exposições dos envidraçados (ver Anexo B), $A_{s,inj}$ é a área efetiva coletora da radiação solar da superfície n que tem orientação j , para a estação de aquecimento, em m^2 , M corresponde à duração média da estação de aquecimento, em meses e n e j correspondem, respetivamente, aos índices que correspondem a cada uma das superfícies e a cada uma das orientações. O valor de G_{sul} depende da zona climática de inverno e da região do país em que se aplica o caso de estudo. Na Tabela 15 encontram-se os valores de G_{sul} e de M .

A área efetiva para a estação de aquecimento ($A_{s,i}$) deve ser calculada para cada vão ou por grupo de vãos, desde que possuem características semelhantes de proteção solar e de incidência da radiação solar. O seu valor pode ser obtido através de:

$$A_{s,i} = A_{vão} \times F_s \times F_g \times g_i \quad (18)$$

onde $A_{vão}$ representa a área total do vão envidraçado, em m^2 , F_s é o fator de obstrução, F_g corresponde à fração envidraçada e g_i é o fator solar do vão envidraçado no inverno. Considerando que na estação de aquecimento não existem dispositivos de sombreamento tem-se que $g_i = F_w \times g_{\perp,vi}$, onde F_w representa o fator de correção da seletividade angular e $g_{\perp,vi}$ é o fator solar do vidro para uma incidência da radiação solar perpendicular ao envidraçado. No Anexo B encontra-se em maior pormenor a descrição e procedimento de cálculo destes fatores.

Para o cálculo dos ganhos totais úteis, o fator de utilização dos ganhos térmicos (η) também difere daquele considerado para o cálculo dos valores de N_i . Este fator depende da inércia térmica do edifício e do quociente (γ) entre os ganhos térmicos brutos e as necessidades brutas de aquecimento. A sua expressão é dada por:

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad (19)$$

se $\gamma \neq 1$, ou caso contrário, é dada por:

$$\eta = \frac{a}{a+1} \quad (20)$$

onde a toma o valor de 4,2, visto todos os casos de estudo corresponderem a edifícios de inércia térmica forte.

A tabela seguinte apresenta alguns dados climáticos importantes para a aplicação das metodologias enunciadas (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006).

Tabela 15 – Dados climáticos para cada região em estudo.

Região	Dados climáticos			
	GD (°C.dia)	M (meses)	G_{sul} (kWh/(m².mês))	Norte ou Sul
Lisboa	1190,00	5,30	108,00	Sul
Faro	1060,00	4,30	108,00	Sul
Évora	1390,00	5,70	108,00	Sul
Coimbra	1460,00	6,00	108,00	Norte
Porto	1610,00	6,70	93,00	Norte
Bragança	2850,00	8,00	90,00	Norte

Os valores limites das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento (N_v) das frações autónomas estudadas podem ser calculados a partir da seguinte expressão:

$$N_v = (1 - \eta_{vref}) \times \frac{Q_{g,vref}}{A_p} \quad (21)$$

em que η_{vref} corresponde ao fator de utilização de ganhos de referência, $Q_{g,vref}$ representa os ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento, em kWh, e A_p a área útil de pavimento da habitação, medida pelo interior, em m².

O fator de referência de utilização de ganhos de referência é dado por:

$$\eta_{vref} = 0,22 \times \ln(3,614 \times (\theta_{ref,v} - \theta_{ext,v})) \quad (22)$$

onde $\theta_{ref,v}$ e $\theta_{ext,v}$ representam, respetivamente, a temperatura interior de referência na estação de arrefecimento e a temperatura exterior média na estação de arrefecimento no local.

Considerou-se como temperatura interior de referência 25 °C e como temperaturas exteriores médias para as regiões estudadas, os valores apresentados na Tabela 32 do Anexo B.

A razão entre os ganhos térmicos de referência e a área útil de pavimento do edifício é dada por:

$$\frac{Q_{g,vref}}{A_p} = \left[q_{int} \times \frac{L_v}{1000} + g_{vref} \times \left(\frac{A_w}{A_p} \right)_{ref} \times I_{sol,ref} \right] \quad (23)$$

onde q_{int} representa os ganhos internos médios de 4 W/m², L_v a duração da estação de arrefecimento, de 2928 horas e g_{vref} o fator solar de referência para a estação de arrefecimento igual a 0,4. A_w e A_p correspondem, respetivamente, à área de vãos e à área útil de pavimento, sendo a razão igual a 20%. $I_{sol,ref}$ representa a radiação solar média de referência, correspondente à radiação incidente numa superfície orientada a oeste, de unidades kWh/m². Os valores da radiação solar média de referência dependem da zona climática e são apresentados na Tabela 32 do Anexo B para cada região considerada no estudo (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006).

A energia útil que é necessária retirar a uma fração autónoma de forma manter a temperatura interior de conforto de referência, ou seja, as necessidades nominais de arrefecimento (N_{vc}) podem ser calculadas a partir de uma expressão semelhante à expressão (21), sendo que desta vez, o fator de utilização de ganhos e os ganhos térmicos totais de que depende não correspondem a expressões de referência.

Os ganhos térmicos totais resultam da soma de três componentes:

$$Q_g = Q_o + Q_s + Q_i \quad (24)$$

em que Q_o corresponde aos ganhos pela envolvente opaca, Q_s representa os ganhos pelos vãos envidraçados e Q_i corresponde aos ganhos internos, todos com unidades kWh. Os ganhos solares pela envolvente opaca podem ser estimados por:

$$Q_o = U \times A \times \left(\frac{\alpha \times I_r}{h_e} \right) \quad (25)$$

onde U representa o coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento da envolvente, em W/(m².K), A corresponde à área do elemento da envolvente, em m², α é o coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior do elemento. O coeficiente de absorção depende da cor da superfície exterior do elemento, tomando o valor de 0,4, 0,5 ou 0,8, para cores claras, médias ou escuras, respetivamente. I_r corresponde à intensidade média da radiação solar incidente, na estação de arrefecimento, com unidades kWh/m² (ver Anexo B) e h_e representa a condutância térmica superficial exterior do elemento da envolvente, tomando o valor de 25 W/(m².K).

Para os ganhos solares através dos envidraçados considera-se a seguinte expressão:

$$Q_s = \sum_j \left[I_{r,j} \times \sum_n A_{s,vnj} \right] \quad (26)$$

onde $I_{r,j}$ representa a energia solar incidente nos envidraçados, em kWh/m², para cada orientação j (ver Anexo B) e $A_{s,vnj}$ corresponde à área efetiva coletora da radiação solar da superfície n que tem orientação j , para a estação de arrefecimento, em m². A área efetiva calcula-se através de uma expressão semelhante a (18), sendo que neste caso em vez de g_i tem-se o fator solar do vão envidraçado na estação de arrefecimento (g_v), considerando que os dispositivos de proteção solares se encontram ativos uma fração de tempo (ver Anexo B).

Por último, os ganhos internos podem ser calculados do seguinte modo:

$$Q_i = \frac{L_v}{1000} \times q_i \times A_p \quad (27)$$

em que L_v representa a duração da estação de arrefecimento, em horas e q_i corresponde aos ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento, que neste caso toma o valor de 4 W/m², visto todos os casos de estudo se tratarem de edifícios residenciais (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006). A_p representa a área útil de pavimento, em m².

Com o fim de calcular as necessidades brutas de arrefecimento, e consequentemente as necessidades nominais de arrefecimento, é necessário ainda estimar as perdas térmicas totais associadas a elementos opacos e envidraçados exteriores e interiores e ainda as perdas associadas à renovação de ar. As perdas térmicas totais podem então ser calculadas pela seguinte expressão:

$$Q_{pt} = \frac{L_v}{1000} \times \left[\sum_j (U_j \times A_j) + H_v + \sum_l (\psi_l \times B_l) \right] \times (\theta_{ref,v} - \theta_{ext,v}) \quad (28)$$

onde o produto entre U_j e A_j representa as perdas térmicas através da envolvente em contacto com o exterior, interior e com o solo, com unidades W/K, H_v representa as perdas associadas à renovação de ar, em W/K, a relação entre ψ_l e B_l refere-se às perdas de calor através das pontes térmicas lineares, $\theta_{ext,v}$ e $\theta_{ref,v}$ correspondem, respetivamente, à temperatura média do ar exterior na estação de arrefecimento e a temperatura interior de referência. Os valores da temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento variam consoante a região e encontram-se apresentados na Tabela 32 do Anexo B.

O passo seguinte para o cálculo das necessidades nominais de arrefecimento consiste em calcular o quociente entre os ganhos térmicos totais e as perdas térmicas totais de forma a estimar o fator de utilização dos ganhos solares (ver expressões (19) e (20)). Por fim é possível calcular os valores de N_{vc} tendo em consideração uma expressão semelhante à que se considerou para o cálculo dos valores de N_v .

4.4.3 Casos com aplicação da metodologia em vigor – RCCTE 2006

De acordo com o Regulamento de 2006, os valores limites das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento (N_v) de uma fração autónoma dependem essencialmente da zona climática de verão. Tendo em conta a Tabela 1 tem-se então que Lisboa, Faro e Évora são caracterizados por um valor limite de 32 kWh/(m².ano) de necessidades nominais de energia útil para arrefecimento. Os valores de N_v para Coimbra e Bragança são iguais a 18 kWh/(m².ano) enquanto o Porto apresenta um valor limite de 16 kWh/(m².ano).

Os valores limites das necessidades nominais de energia útil para aquecimento (N_i), dependem dos graus-dias de aquecimento (GD) e do fator de forma da habitação (FF).

O fator de forma da habitação é dado pelo quociente entre o somatório das áreas da envolvente exterior (A_{ext}) e interior (A_{int}) da fração autónoma com exigências térmicas e o volume interior da fração em causa (V).

$$FF = \frac{[A_{ext} + \sum(\tau \times A_{int})]}{V} \quad (29)$$

Onde τ corresponde a um coeficiente já referido anteriormente na expressão (9).

Calculando o fator de forma (FF) e tendo em conta os valores de GD (ver Tabela 15) é então possível calcular os valores limites das necessidades nominais de energia útil para aquecimento de acordo com as seguintes condições:

Se $FF \leq 0,5$:

$$N_i = 4,5 + 0,0395 \times GD \quad (30)$$

Se $0,5 < FF \leq 1$:

$$N_i = 4,5 + (0,021 + 0,037 \times FF) \times GD \quad (31)$$

Se $1 < FF \leq 1,5$:

$$N_i = [4,5 + (0,021 + 0,037 \times FF) \times GD] \times (1,2 - 0,2 \times FF) \quad (32)$$

Se $FF > 1,5$:

$$N_i = 4,05 + 0,06885 \times GD \quad (33)$$

O cálculo dos valores de N_{ic} , segundo a nova metodologia, mantém-se idêntica à utilizada atualmente, variando apenas os valores dos coeficientes de transmissão térmica lineares e superficiais de referência.

Relativamente ao cálculo dos valores de N_{vc} é de notar que a metodologia atualmente em vigor, ao invés da nova metodologia, não considera as perdas pela envolvente interior nem as perdas através das pontes térmicas lineares. O restante procedimento de cálculo é semelhante variando apenas os valores dos coeficientes de transmissão térmica já referidos.

4.5 Análise de resultados

As figuras seguidamente apresentadas ilustram os resultados obtidos da análise energética dos casos de estudo a partir da aplicação das diferentes metodologias enunciadas anteriormente.

Os resultados apresentados referem-se apenas às regiões de Faro e Bragança, sendo as regiões que apresentam os resultados mais expressivos para a estação de arrefecimento e de aquecimento, respetivamente. Os resultados referentes às restantes regiões encontram-se apresentados no Anexo C.

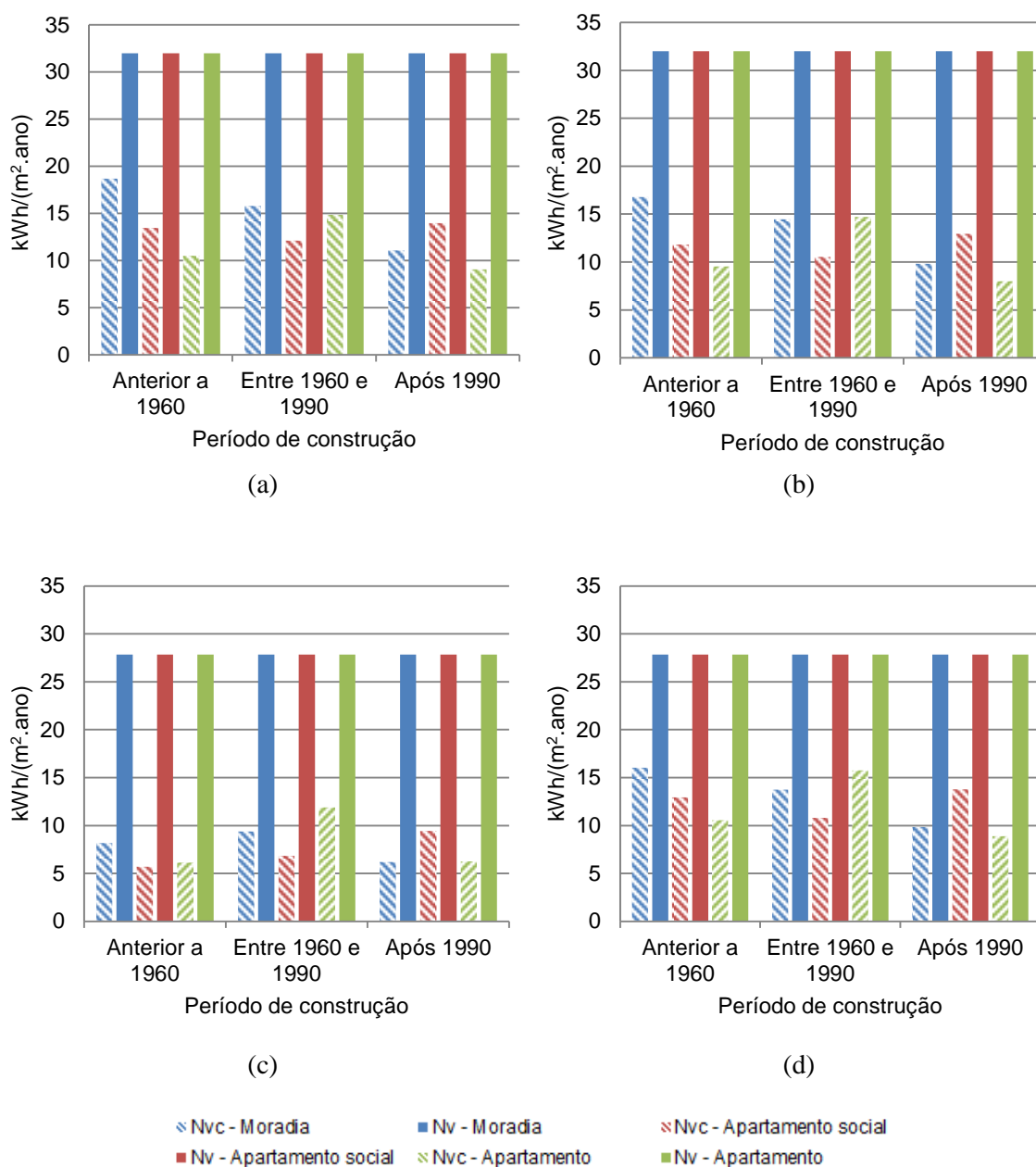
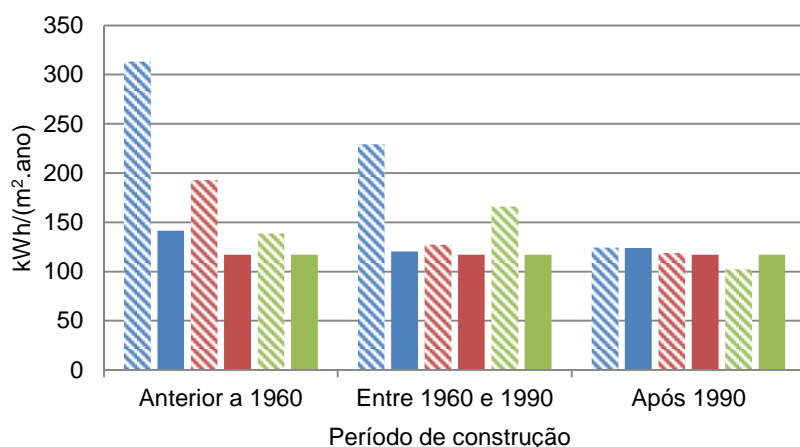
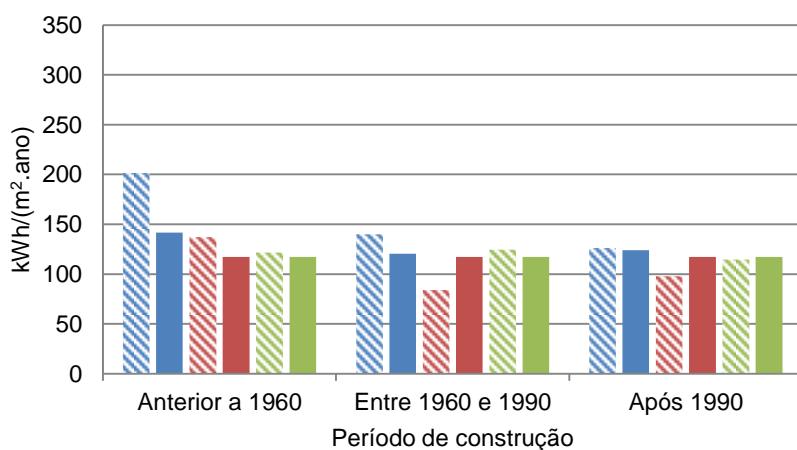


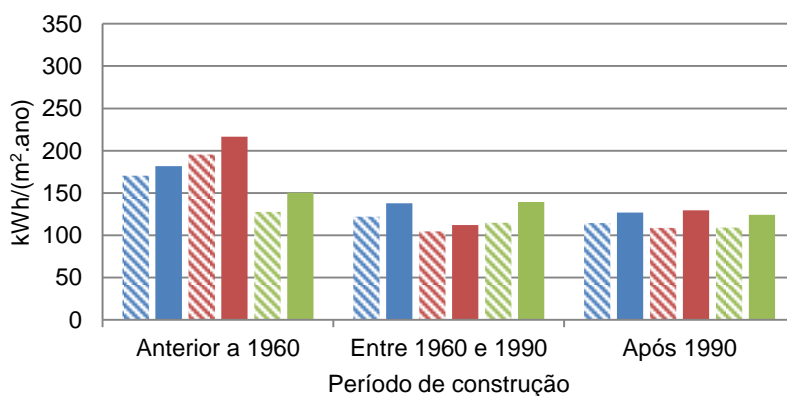
Figura 17 – Resultados das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento e respetivos valores limites para a região de Faro. (a) Situação de valores de U reais segundo o RCCTE de 2006; (b) Situação de valores de U_{ref} segundo o RCCTE de 2006; (c) Situação de valores de U_{ref} segundo o novo RCCTE; (d) Situação de utilização das duas versões do RCCTE.



(a)



(b)



(c)

▨ Nic - Moradia ■ Ni - Moradia ▨ Nic - Apartamento social
■ Ni - Apartamento social ▨ Nic - Apartamento ■ Ni - Apartamento

Figura 18 – Resultados das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e respetivos valores limites para a região de Bragança. (a) Situação de valores de U reais segundo o RCCTE de 2006; (b) Situação de valores de U_{ref} segundo o RCCTE de 2006; (c) Situação de valores de U_{ref} segundo o novo RCCTE.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que, de uma forma global, a alteração dos valores dos coeficientes de transmissão térmica promove alterações mais significativas para a estação de aquecimento, sendo que as soluções com coeficientes de transmissão térmica mais restritos originam necessidades de energia para aquecimento mais reduzidas. Em contraste, observa-se que o nível de isolamento na envolvente é menos expressivo na redução das necessidades de energia para arrefecimento. Para a estação de arrefecimento, os resultados obtidos são menos expressivos que os resultados associados à estação de aquecimento, uma vez que nos casos de estudo utilizaram-se soluções com sombreamento eficaz.

Comparando os resultados obtidos na aplicação do RCCTE de 2006, atualmente em vigor, com os coeficientes de transmissão térmica de referência e os efetivos dos casos de estudo (ver Anexo C) verifica-se que existem algumas discrepâncias nos valores das necessidades nominais de arrefecimento e aquecimento. Os coeficientes de transmissão térmica relativos aos casos originais foram calculados tendo em conta os materiais de construção utilizados em cada habitação aquando da sua construção, não se considerando possíveis alterações efetuadas nos períodos posteriores. Estes valores são, na maioria dos casos, superiores aos valores de referência presentes no RCCTE de 2006, resultando em maiores necessidades nominais de aquecimento.

A Figura 18 permite uma melhor visualização dos resultados para a estação de aquecimento na região de Bragança. Comparando as necessidades de energia para aquecimento (N_{ic}) e respetivos valores limite do gráfico (a) verifica-se que, na maioria dos casos de estudo, as necessidades ultrapassam o valor máximo admitido para a estação de aquecimento, sendo que os casos correspondentes ao período de construção pós década de 90 são os menos expressivos e como tal os que melhor obedecem aos valores limite. Nos casos em que se aplicou os coeficientes de transmissão térmica de referência do RCCTE atualmente em vigor (gráfico (b)), verifica-se uma melhoria em termos das necessidades de energia e consequentemente observa-se que, nalguns casos, estas são inferiores aos valores máximos admissíveis.

As restantes regiões apresentam um comportamento semelhante, sendo que as necessidades nominais de energia para aquecimento e respetivos valores máximos são mais reduzidos (ver Anexo C).

Relativamente às necessidades nominais de energia para arrefecimento com base no RCCTE de 2006, verifica-se que a utilização dos coeficientes de transmissão térmica de referência em vez dos valores reais promove o aumento das necessidades de energia na habitação, para a maioria dos casos de estudo na região de Bragança e Porto. Pelo contrário, nas restantes regiões estudadas, observa-se uma redução das necessidades nominais de energia para arrefecimento (ver Figura 17).

Através da observação das tabelas do Anexo C verifica-se que as necessidades nominais de arrefecimento (N_{vc}) resultantes da aplicação da nova metodologia de cálculo do RCCTE são significativamente inferiores aos valores obtidos através da aplicação da metodologia atual. Tal se deve ao facto da nova metodologia, ao contrário da que se encontra em vigor, considerar perdas pelas pontes térmicas e ainda perdas pela envolvente interior, contribuindo para uma menor necessidade de arrefecer o meio ambiente interior.

Por sua vez, em termos das necessidades de aquecimento, os ganhos térmicos e as perdas térmicas totais diminuem, devido ao maior rigor dos coeficientes de transmissão térmica, resultando, nalguns casos de estudo, em necessidades de aquecimento menores comparativamente à aplicação dos valores de referência e metodologia de aplicação do RCCTE de 2006. Verifica-se ainda que os valores das necessidades nominais de aquecimento, de acordo com a nova metodologia de cálculo, são superiores para todos os casos referentes aos apartamentos sociais e ainda no caso do apartamento considerado “normal” pertencente ao período anterior a 1960 em Bragança e no Porto. Nestes casos o coeficiente global de perdas é superior, comparativamente à metodologia atual, para estas regiões climáticas, levando a estes resultados.

O novo regulamento apresenta valores de referência dos coeficientes de transmissão térmica lineares ao invés do RCCTE em vigor (ver Tabela 28 do Anexo A). Segundo o regulamento atual, o coeficiente de transmissão térmica linear encontra-se em função de outros fatores que caracterizam a habitação, como sendo a espessura de pavimentos, fachadas, a diferença entre a superfície superior do pavimento e a cota do terreno exterior entre outros. A utilização de valores de referência pode ter como consequência o aumento dos coeficientes de transmissão térmica lineares e por sua vez o aumento das necessidades brutas de aquecimento, como se observou nos casos referidos anteriormente.

A nova metodologia, que se encontra em fase de avaliação, permite reduzir os valores limites das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento (N_v) e aumentar os valores limites para aquecimento (N_i). A partir da Figura 18 (gráfico c) observa-se que os edifícios em estudo cumprem com os valores limites para aquecimento ao contrário do que se observou para os casos em que se aplicou o RCCTE de 2006.

A metodologia de aplicação do novo RCCTE leva a resultados significativamente diferentes daqueles obtidos pela aplicação da metodologia atual, nomeadamente no que toca às necessidades nominais de arrefecimento, como já foi referido anteriormente. Estes resultados levaram ao desenvolvimento de uma nova abordagem de forma a diferenciar a futura metodologia de cálculo das necessidades de arrefecimento do RCCTE dos respetivos valores de coeficientes de transmissão térmica.

A nova abordagem resulta da aplicação da metodologia já existente para o RCCTE atual mas utilizando valores de coeficientes de transmissão térmica de referência iguais aos considerados na metodologia do novo RCCTE.

Através da análise dos resultados (ver Figura 17 gráfico d) verifica-se agora que a maioria dos casos de estudo apresenta necessidades de arrefecimento superiores às do caso de aplicação do RCCTE atual.

Apesar dos ganhos e perdas térmicas totais serem mais reduzidos, devido às maiores exigências em termos dos materiais de construção, ou seja, coeficientes de transmissão térmica mais restritos, o fator de utilização dos ganhos solares é significativamente inferior. A redução das perdas leva a necessidades brutas de arrefecimento superiores e consequentemente necessidades nominais de arrefecimento também superiores para a metodologia do novo RCCTE.

5. Análise de custo-ótimo

A Diretiva relativa ao Desempenho Energético de Edifícios (de sigla EPBD⁸), datada de 2002, estabelecia uma metodologia geral que permitia que todos os países da UE definissem valores máximos de energia consumida, com o intuito de satisfazer as necessidades energéticas assumindo uma utilização *standard* dos edifícios e metodologias de cálculo nacionais. No entanto, esta diretiva não estabelecia quaisquer requisitos relativos aos níveis desejáveis de consumo energético. Como consequência, os diferentes países optaram por diferentes abordagens e níveis de ambição levando a situações em que seria possível adotar estratégias mais ousadas.

A EPBD de 2010 estabelece que os Estados Membros devem assegurar que sejam implementados requisitos mínimos associados ao desempenho energético, de forma a atingir níveis de custo-ótimo. Sendo que estes níveis devem ser determinados de acordo com uma metodologia estabelecida pela Comissão Europeia (European Commission 2012).

A metodologia apresenta a seguinte estrutura (The Buildings Performance Institute Europe 2011):

1. Definição de edifícios de referência: edifícios caracterizados pelas suas funcionalidades e condições climáticas. Esta metodologia engloba edifícios residenciais e não residenciais, no entanto para o trabalho em questão apenas são estudados casos representativos do sector residencial;
2. Definição de medidas de eficiência energética: podem ser medidas que tenham impacto direto ou indireto na performance energética do edifício, sejam medidas implementadas no edifício como um todo, ou apenas num elemento, ou combinações de elementos, do edifício;
3. Determinação das necessidades de energia dos edifícios de referência e dos mesmos com a aplicação das medidas de eficiência energética;
4. Cálculo dos custos associados às medidas de eficiência energética adotadas durante o ciclo de vida económico esperado para os edifícios de referência: devem ser considerados custos de investimento, de manutenção e operação, custos de energia e custos de eliminação.

5.1 Definição do custo-ótimo

O custo-ótimo consiste num valor teórico ótimo para as poupanças energéticas e custos associados. Este valor pode ser determinado a partir da curva de custos correspondendo à zona mais baixa, e portanto de menor custo, desta (ver Figura 19) (The Buildings Performance Institute Europe 2011).

De forma a se obter uma curva de custos clara e de fácil interpretação, devem ser tomadas diversas estratégias e medidas que se encontrem de acordo com os regulamentos atuais e com as melhores práticas de poupança energética e ainda combinações de medidas que permitam alcançar o conceito de casas passivas e edifícios com necessidades quase nulas de energia.

Se os custos das medidas estudadas forem semelhantes, devem ser adotadas aquelas que resultem em menores necessidades energéticas e que por sua vez conduzam a maiores benefícios ambientais e à redução da dependência energética.

⁸ *Energy Performance of Buildings Directive*



Figura 19 – Curva de custos: posição do custo-ótimo, dos requisitos mínimos implementados e do custo associado a edifícios de necessidades quase nulas de energia (The Buildings Performance Institute Europe 2011).

A área representada à direita do ponto do ótimo económico representa os requisitos mínimos estabelecidos pela diretiva referida anteriormente. Essa área representa soluções que poderiam ser melhoradas tanto em termos financeiros como ambientais. Com o objetivo de cumprir metas ainda mais exigentes a nível energético, alguns países podem ainda optar por requisitos ainda mais restritivos que aqueles que caracterizam o ótimo económico. A implementação desses requisitos, representados pela área à esquerda do ponto ótimo, poderá levar aos edifícios de necessidades quase nulas de energia.

5.2 Metodologia de cálculo

No âmbito deste trabalho e com o objetivo de realizar uma análise de custo ótimo dos casos de estudo, adotou-se uma abordagem de cálculos económicos baseada na Norma Europeia 15459.

Esta norma providencia um método de cálculo da avaliação económica de diferentes sistemas consumidores de energia presentes nos edifícios (Zirngibl & François 2010). Os propósitos deste método passam por:

- Estudar a viabilidade económica de diferentes opções de conservação de energia nos edifícios;
- Comparar diferentes soluções de poupança energética nos edifícios;
- Estudar o desempenho económico numa perspetiva global do edifício;
- Avaliar o efeito de possíveis medidas de conservação de energia nos sistemas de aquecimento e demais sistemas consumidores de energia, a partir de cálculos económicos do custo da energia utilizada, com ou sem medidas de conservação de energia.

Todos os propósitos enunciados são relevantes para este trabalho tendo em consideração que se pretende realizar uma análise económica e energética de diferentes edifícios, no âmbito das necessidades de aquecimento e arrefecimento, tendo em consideração diferentes soluções de minimização dessas necessidades.

Com o objetivo de aplicar esta metodologia de cálculo devem ser determinados diversos parâmetros importantes para o cálculo do custo-ótimo. Estes são diferentes para cada Estado Membro e dependem de outros fatores, sendo muitos deles variáveis ao longo do tempo. Os valores adotados para estes parâmetros encontram-se ao longo das subseqüentes secções da análise de custo-ótimo e são eles: o ciclo de vida económico esperado para o edifício e seus elementos, a taxa de desconto, os fatores de energia primária, os diferentes custos relacionados com as medidas associadas às soluções de poupança energética nos edifícios e o preço da energia.

A Norma 15459 não especifica um período de tempo para a aplicação da metodologia. No entanto, considera-se que os cálculos económicos incluem custos de construção e de energia para um período de 30 anos. Não é recomendado um período superior devido à dificuldade, na previsão a longo prazo, das taxas de juro e dos preços da energia (The Buildings Performance Institute Europe 2011).

Os custos de construção não foram considerados na sua totalidade, mas sim apenas os componentes e trabalhos de construção relacionados com o desempenho energético, isto é, apenas se teve em consideração os custos associados às soluções de poupança energética definidas posteriormente.

Os custos de mão-de-obra, do material utilizado, meios auxiliares e custos indiretos foram considerados como custos de construção relacionados com a performance energética dos edifícios em estudo.

A energia utilizada para cobrir as necessidades de arrefecimento e aquecimento encontra-se associada a custos anuais que devem ser considerados. Teve-se ainda em consideração os custos de manutenção periódicos associados aos materiais de construção.

O custo global relacionado com o desempenho energético é dado pela soma entre os custos de construção relacionados com a performance energética e os custos de energia para 30 anos, associados à energia utilizada no aquecimento e arrefecimento ambiente. Visto que os custos de construção base não foram considerados nesta análise estabeleceu-se, para cada caso de estudo, uma relação com o edifício de referência, considerado como construção base (Kurnitski, Saari et al. 2011). Essa relação é dada pela seguinte expressão:

$$C_g = \frac{C_I + \sum_{i=1}^{30} (C_{a,i} \times R_d(i))}{A_p} - \frac{C_g^{ref}}{A_p} \quad (34)$$

onde C_g corresponde ao custo global acrescido relacionado com o desempenho energético, em €/m², C_I representa o custo de construção relacionado com o desempenho energético ou custo de investimento, em €, $C_{a,i}$ corresponde ao custo de energia anual durante o ano i , em €, $R_d(i)$ é o fator de desconto para o ano i , C_g^{ref} corresponde ao custo global relacionado com o desempenho energético do edifício de referência, em € e A_p representa a área útil de pavimento que é aquecida ou arrefecida, em m².

O fator de desconto, $R_d(i)$, depende do número de anos em que se desconta (i) e da taxa de desconto (r) (European Commission 2012).

$$R_d(i) = \left(\frac{1}{1 + r/100} \right)^i \quad (35)$$

O método de cálculo aconselha a realização de uma análise de sensibilidades utilizando no mínimo duas taxas de desconto com o objetivo de determinar qual a taxa a utilizar nos cálculos (European Commission 2012). A análise sugerida não foi efetuada, tendo sido utilizada nos cálculos uma taxa de 3% aconselhada pela bibliografia (Directorate General for Energy 2011).

O custo global calculado a partir da expressão (34) define-se como um custo acrescido, visto que corresponde a soluções que funcionam como substituição da solução de referência. O primeiro valor que se obtém para C_g corresponde à comparação da solução de referência com ela própria originando o primeiro ponto da curva de custos que será zero para o custo global

acrescido. Os restantes pontos serão negativos ou positivos, formando uma curva se existirem pontos suficientes.

O custo global acrescido é negativo se a solução de referência, representado pelo C_g^{ref} , não for a melhor solução em termos de custo. Por outro lado, se C_g for positivo, isto é se a aplicação de outras soluções ao caso de referência levar a maiores custos que esta, então, o caso de referência é a melhor solução (Kurnitski, Saari et al. 2011).

5.3 Edifícios de referência para o cálculo do custo-ótimo

Os edifícios considerados para o estudo da viabilidade económica são os mesmos que foram analisados no capítulo da abordagem “*bottom-up*”.

A análise energética e económica foi realizada com base em duas medidas aplicadas separadamente nos casos de estudo. A primeira consistiu na aplicação de diferentes níveis de isolamento na envolvente exterior opaca, de forma a alcançar o ótimo económico. A partir dos níveis de isolamento calcularam-se os diferentes valores de coeficientes de transmissão térmica das fachadas dos edifícios em estudo, tanto nas moradias como nos apartamentos, sendo que nestas primeiras se considerou também graus de isolamento iguais para as coberturas e pavimentos exteriores.

A segunda medida estudada constou na aplicação de diferentes tipos de vidros, sendo que estes diferem na espessura e principalmente no tipo de vidro (simples ou duplo).

Na aplicação destas medidas nos casos de estudo, teve-se em consideração as soluções construtivas iniciais e restantes características dos edifícios, modificando apenas os fatores responsáveis pela alteração do consumo energético. Ou seja, no caso da alteração do tipo de vidro, manteve-se a área de envidraçado, tipo de caixilho e dispositivo de oclusão noturna característico de cada habitação. Por sua vez, a medida relacionada com a aplicação de diferentes níveis de isolamento, não implicou a alteração dos restantes componentes das superfícies opacas. De notar que o estudo da influência das duas medidas no consumo energético e custo associado foi efetuado separadamente, isto é, a aplicação de uma das medidas não implicou qualquer alteração nas soluções construtivas originais associadas às restantes medidas.

Visto tratarem-se de casos de diferentes tipologias e representativos de épocas distintas, são caracterizados por soluções construtivas diferenciadas. As medidas de poupança energética estudadas devem ser então comuns para todos os casos de forma a originar um número de pontos suficientes com o objetivo de construir as curvas de custo e comparar os resultados obtidos. Sendo assim, os casos que já apresentavam nas suas soluções construtivas iniciais algum tipo de isolamento⁹ ou janelas constituídas por vidro duplo⁹ deixariam de ser caracterizadas por estas soluções. Estas medidas permitem que todos os casos de referência apresentem custos de construção, e consequentemente curvas de custo, semelhantes.

Os edifícios de referência, seguindo a primeira medida de estudo, são então caracterizados pelas respetivas soluções construtivas originais, sem qualquer tipo de isolamento. Relativamente à segunda medida, de forma a igualar todos os casos, considerou-se que as janelas dos edifícios de referência seriam constituídas por vidro simples de 4 mm de espessura.

Tendo em consideração que as necessidades de energia e alguns dos custos, nomeadamente os custos associados à mão de obra, dependem da localização geográfica, procedeu-se ao cálculo destes, tanto dos edifícios de referência, como dos edifícios com as soluções de eficiência energética aplicadas, para diferentes regiões. As regiões consideradas foram Bragança, Lisboa e Porto.

⁹ Casos da moradia e apartamento representativos do período de construção pós década de 90.

5.3.1 Isolamento térmico

O isolamento térmico aplicado na envolvente exterior, tal como já foi referido anteriormente, é um forte aliado na redução das perdas de calor na estação de aquecimento e na capacidade de regulação da temperatura interior. As vantagens associadas a esta medida justificam o estudo da aplicação de diferentes espessuras de isolamento térmico pelo exterior dos elementos opacos (fachadas e coberturas).

As várias espessuras consideradas encontram-se descritas na Tabela 16, juntamente com os valores dos coeficientes de transmissão térmicos correspondentes às fachadas dos edifícios em estudo. A constituição das fachadas apresentada na tabela refere-se às soluções originais de cada caso de estudo, sendo então acrescido o respetivo isolante térmico.

Para este estudo foi considerado como isolante térmico, comum para todos os casos e tipos de envolvente exterior onde é aplicado, um painel rígido de poliestireno expandido com uma condutividade térmica de 0,04 W/(m.K) e densidade de 20 kg/m³ (Santos & Matias 2009). Os restantes constituintes dos elementos opacos verticais e horizontais apresentam as mesmas propriedades térmicas consideradas para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica dos casos originais (ver secção 4.2.2).

Tabela 16 – Constituição e caracterização térmica das fachadas

Período de construção	Tipologia	Constituição	U (W/(m ² .K))						
			0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm	12 cm
Até 1960	Moradia (T2)	Simples tijolo de alvenaria composta (34 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,58	0,88	0,61	0,47	0,38	0,32	0,28
	Apartamento Social (T3)	Simples tijolo (24 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,33	0,80	0,57	0,44	0,36	0,31	0,27
	Apartamento (T3)	Dupla tijolo (11 e 15 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	0,97	0,65	0,49	0,39	0,33	0,28	0,25
De 1960 a 1990	Moradia (T5)	Simples tijolo (25 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,33	0,80	0,57	0,44	0,36	0,31	0,27
	Apartamento Social (T3)	Dupla tijolo (11 e 7 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,53	0,87	0,60	0,46	0,38	0,32	0,27
	Apartamento (T3)	Dupla tijolo (11 e 11 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	1,10	0,71	0,52	0,41	0,34	0,29	0,26
		Simples tijolo (11 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	2,16	1,04	0,68	0,51	0,41	0,34	0,29
Após 1990	Moradia (T5)	Dupla tijolo (15 e 11 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	0,97	0,65	0,49	0,39	0,33	0,28	0,25
	Apartamento Social (T3)	Dupla tijolo (15 e 11 cm) + reboco (1,5 cm+1,5 cm)	0,97	0,65	0,49	0,39	0,33	0,28	0,25
	Apartamento (T3)	Dupla tijolo com caixa-de-ar (25 cm) + reboco (1,5 cm)	1,35	0,81	0,57	0,45	0,36	0,31	0,27

A tabela seguinte apresenta os resultados dos coeficientes de transmissão térmica resultantes da aplicação de isolamento nas coberturas das moradias.

Tabela 17 – Constituição e caracterização térmica das coberturas

Período de construção	Tipologia	Constituição	U (W/(m ² .K))						
			0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm	12 cm
Até 1960	Moradia (T2)	Madeira sem forro (20cm) + reboco (1,5 cm) ^{vi}	2,21	1,05	0,69	0,51	0,41	0,34	0,29
De 1960 a 1990	Moradia (T5)	Laje de betão (15 cm) + reboco (1,5 cm) ^{vi}	2,43	1,10	0,71	0,52	0,41	0,34	0,29
		Laje de betão (20 cm) + reboco (1,5 cm) + acabamento (3 cm) ^{vii}	1,81	0,95	0,64	0,49	0,39	0,33	0,28
			1,61	0,89	0,62	0,47	0,38	0,32	0,28
Após 1990	Moradia (T5)	Bloco cerâmico (18 cm) + reboco (1,5 cm) ^{vi}	1,75	0,93	0,64	0,48	0,39	0,33	0,28
		Bloco cerâmico (18 cm) + reboco (1,5 cm) + telha (1 cm) ^{vii}	1,87	0,97	0,65	0,49	0,39	0,33	0,28
			1,65	0,90	0,62	0,47	0,38	0,32	0,28

^{vi} Estes elementos constituem as esteiras horizontais que separam dois espaços interiores, um útil de outro não útil.

^{vii} Estes elementos representam as coberturas que separam um espaço útil interior da envolvente exterior, sendo apresentados dois valores de U . O primeiro corresponde à situação de fluxo de calor de sentido ascendente e o segundo à situação de fluxo descendente.

5.3.2 Vãos envidraçados

O estudo desta solução de poupança energética nos edifícios teve como objetivo encontrar um sistema de envidraçados que fosse mais eficiente, alterando somente o tipo de vidro, a espessura do vidro e, para os casos em que se considerou vidro duplo, o espaçamento da lâmina de ar.

A solução ideal seria aquela que minimizasse as perdas de calor com o menor custo associado possível. No total foram considerados quatro sistemas diferentes apresentados na Tabela 18.

São ainda apresentados os valores convencionais dos coeficientes de transmissão térmica totais dos vão envidraçados aplicáveis a janelas de locais com utilização diurna e noturna relevantes, assumindo ainda que os dispositivos de oclusão noturna sejam totalmente fechados no período noturno (Santos & Matias 2009).

Tabela 18 – Constituição e caracterização térmica dos vãos envidraçados

Período de construção	Tipologia	Constituição	U (W/(m ² .K))			
			Vidro simples, 4 mm	Vidro duplo, 4/6/6 mm	Vidro duplo, 6/16/6 mm	Vidro duplo (b.e.) ^{viii} , 6/16/6 mm
Até 1960	Moradia (T2)	Portadas interiores + caixilho de madeira	3,40	2,50	2,20	2,00
	Apartamento Social (T3)	Estores exteriores + caixilho de madeira com quadrículas	3,40	2,50	2,20	2,00
	Apartamento (T3)	Estores exteriores + caixilho de madeira	3,40	2,50	2,20	2,00
De 1960 a 1990	Moradia (T5)	Estores exteriores + caixilho de madeira	3,40	2,50	2,20	2,00
		Cortina interior + caixilho de madeira	4,30	2,90	2,50	2,40
	Apartamento Social (T3)	Estores exteriores + caixilho de madeira	3,40	2,50	2,20	2,00
		Cortina interior + caixilho de madeira	4,30	2,90	2,50	2,40
	Apartamento (T3)	Estores exteriores + caixilho de alumínio	4,10	3,10	2,90	2,70
		Caixilho de alumínio	6,50	4,50	4,00	3,70
Após 1990	Moradia (T5)	Persianas exteriores + caixilho de madeira com quadrículas	3,40	2,50	2,20	2,00
		Cortina interior + caixilho de madeira	4,30	2,90	2,50	2,40
		Persianas exteriores + caixilho de alumínio	4,10	3,10	2,90	2,70
		Persianas exteriores + caixilho de alumínio	3,80	2,80	2,60	2,30
		Cortina interior + caixilho de alumínio	5,20	3,90	3,50	3,30
	Apartamento Social (T3)	Estores exteriores + caixilho de madeira	3,40	2,50	2,20	2,00
	Apartamento (T3)	Estores exteriores + caixilho em alumínio ^{ix}	3,60	2,70	2,50	2,30

^{viii} Vidro duplo de baixa emissividade.

^{ix} Janela com corte térmico.

5.4 Análise energética

O método de cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento adotado corresponde ao presente no RCCTE em vigor, descrito numa fase anterior deste trabalho.

Conhecendo as necessidades de aquecimento e arrefecimento para cada caso de estudo (ver Anexo D), tendo em conta as diferentes medidas aplicadas na estrutura base de cada edifício, é possível calcular a energia que é entregue aos sistemas de conversão de energia (energia final) e consequentemente a energia primária.

A energia final é calculada a partir da razão entre a energia útil, correspondente às necessidades de aquecimento/arrefecimento calculadas, e a eficiência energética dos sistemas de climatização para aquecimento/arrefecimento.

Admitindo que os edifícios em estudo apresentam todos os mesmos tipos de sistemas de climatização, não sendo este um fator variante na análise económica, e que correspondem a unidades de produção térmica de sistemas de ar condicionado com classe de eficiência mínima D tem-se então, para sistemas com permuta ar-água, um EER mínimo de 2,80 e um COP¹⁰ mínimo de 3,10. Estas classificações de desempenho energético encontram-se de acordo com o futuro Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios¹¹.

Para calcular a energia primária, multiplica-se a energia final por um fator de energia primária igual a 2,5. A conversão para energia elétrica considera o rendimento elétrico (40%) das centrais termoeletricas que utilizam combustíveis fósseis (Despacho n.º 17313/2008 2008).

O preço da energia elétrica, para efeitos de cálculo, foi considerado tendo em conta um tarifário simples de baixa tensão normal superior a 2,3 kVA¹². O valor utilizado foi de 0,1393 €/kWh (EDP Energias de Portugal 2009)

5.5 Análise económica

Na presente secção pretende-se apresentar alguns dos custos relevantes para aplicação da fórmula de cálculo (34).

Todos os preços considerados nesta fase foram obtidos através do gerador de preços para construção civil da CYPE¹³. Recorreu-se a valores de referência para as regiões em estudo, disponibilizados numa base de dados que facilita informação técnica, descrição e preços de diversos artigos de construção (Top - Informática Lda. 2012).

Os custos apresentados correspondem apenas a um dos casos de estudo, sendo que os restantes casos são apresentados no Anexo D. O caso de estudo exemplificado nesta secção corresponde ao caso da moradia pertencente ao período de construção anterior à década de 60 aplicado a diferentes regiões climáticas.

5.5.1 Isolamento térmico

Nas tabelas seguintes apresentam-se os custos associados às diferentes soluções de isolamento estudadas. Os valores apresentados foram incluídos nos cálculos, sendo que os valores do custo global acrescido relacionado com o desempenho energético foram utilizados na construção das curvas de custo-ótimo apresentadas posteriormente.

¹⁰ COP (do inglês *Coefficient Of Performance*) corresponde à razão entre a energia térmica fornecida pelo sistema de aquecimento e a energia consumida pelo próprio sistema.

¹¹ Informação proveniente da documentação de trabalho da comissão técnica para a revisão regulamentar.

¹² A tarifa simples adequa-se à maioria dos clientes residenciais. As potências contratadas para este sector são, em grande parte dos casos, iguais ou inferiores a 41,4 kVA, com 1,15 kVA como mínimo.

¹³ A *CYPE Ingenieros, S.A.* é uma empresa que apresenta uma extensa biblioteca de *software* vocacionado para projetos de edificação.

Tabela 19 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de isolamento térmico para a região de Bragança.

	Soluções de isolamento térmico						
	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm	12 cm
Custo de construção (€)	0	537,69	758,97	980,95	1204,29	1426,95	1650,99
Custo anual da energia elétrica (€)	974,06	777,16	710,85	677,26	657,37	643,78	634,32
Custo de manutenção (€)	0	11,03	15,17	19,30	23,44	27,57	31,71
C_g (€/m ²)	0	-47,77	-63,27	-69,47	-71,77	-72,29	-71,62

Tabela 20 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de isolamento térmico para a região do Porto.

	Soluções de isolamento térmico						
	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm	12 cm
Custo de construção (€)	0	585,26	806,54	1028,51	1252,55	1589,40	1698,56
Custo anual da energia elétrica (€)	524,33	413,73	376,58	357,74	346,64	339,07	333,77
Custo de manutenção (€)	0	11,72	15,86	20,68	24,82	28,95	33,09
C_g (€/m ²)	0	-22,59	-29,81	-31,83	-31,63	-28,77	-28,60

Tabela 21 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de isolamento térmico para a região de Lisboa.

	Soluções de isolamento térmico						
	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm	12 cm
Custo de construção (€)	0	594,91	817,57	1039,54	1262,20	1485,55	1708,21
Custo anual da energia elétrica (€)	435,13	349,10	319,94	305,06	296,26	290,24	286,04
Custo de manutenção (€)	0	12,41	16,54	20,68	24,82	28,95	33,09
C_g (€/m ²)	0	-15,47	-20,41	-21,31	-20,47	-18,84	-16,69

Os custos de manutenção apresentados para o isolamento térmico correspondem a custos periódicos decenais. Os valores pesquisados correspondem apenas a custos referentes aos primeiros dez anos e para isolamentos aplicados no exterior de fachadas, no entanto para efeitos de cálculo considerou-se que os custos de manutenção seriam sempre os mesmos de dez em dez anos e que seriam idênticos para a aplicação em coberturas para os casos das moradias.

5.5.2 Vãos envidraçados

Nas tabelas seguintes apresentam-se os custos associados às diferentes soluções correspondentes aos vãos envidraçados para diferentes regiões climáticas.

Tabela 22 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de vidro para a região de Bragança.

	Soluções de vidro			
	Vidro simples, 4 mm	Vidro duplo, 4/6/6 mm	Vidro duplo, 6/16/6 mm	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm
Custo de construção (€)	129,78	185,48	219,77	282,66
Custo anual da energia elétrica (€)	974,06	950,12	942,27	937,00
Custo de manutenção (€)	32,43	38,93	46,17	59,38
C_g (€/m ²)	0	-5,85	-7,44	-7,77

Tabela 23 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de vidro para a região do Porto.

	Soluções de vidro			
	Vidro simples, 4 mm	Vidro duplo, 4/6/6 mm	Vidro duplo, 6/16/6 mm	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm
Custo de construção (€)	137,28	199,16	233,40	296,30
Custo anual da energia elétrica (€)	524,33	511,47	507,26	504,47
Custo de manutenção (€)	34,35	41,80	48,99	62,20
C_g (€/m ²)	0	-2,60	-3,16	-2,78

Tabela 24 – Valores referentes ao custo global relacionado com o desempenho energético para cada solução de vidro para a região de Lisboa.

	Soluções de vidro			
	Vidro simples, 4 mm	Vidro duplo, 4/6/6 mm	Vidro duplo, 6/16/6 mm	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm
Custo de construção (€)	139,09	202,57	236,87	299,70
Custo anual da energia elétrica (€)	435,13	426,66	423,85	421,96
Custo de manutenção (€)	34,77	42,55	49,74	62,94
C_g (€/m ²)	0	-1,33	-1,49	-0,85

Tal como no caso do isolamento térmico, os custos referentes à manutenção dos vidros são decenais, como tal foi assumido o mesmo pressuposto que o considerado anteriormente.

5.6 Análise de resultados

5.6.1 Isolamento térmico

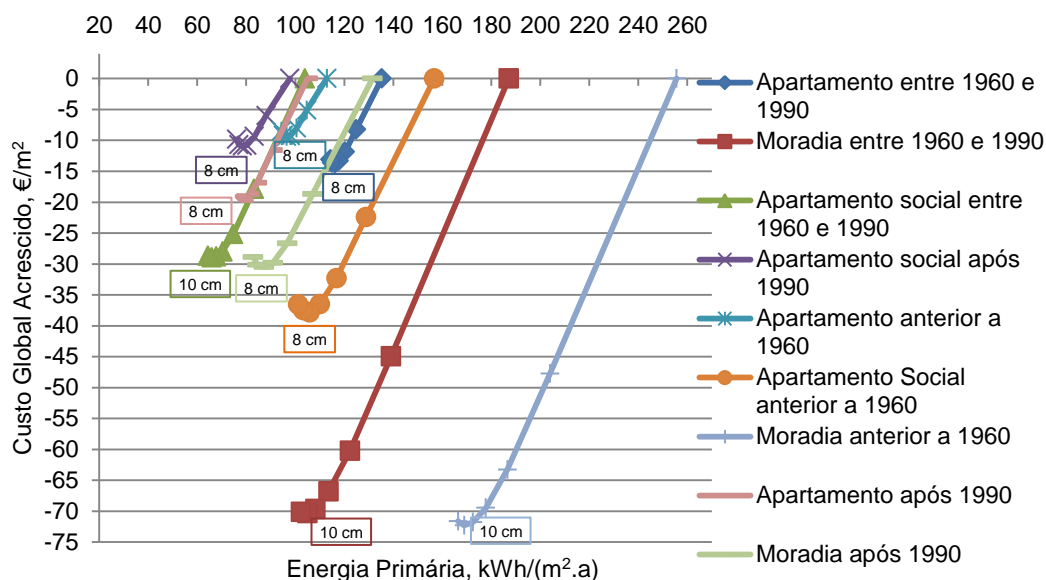


Figura 20 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de isolamento térmico, para os diferentes casos de estudo, na região de Bragança.

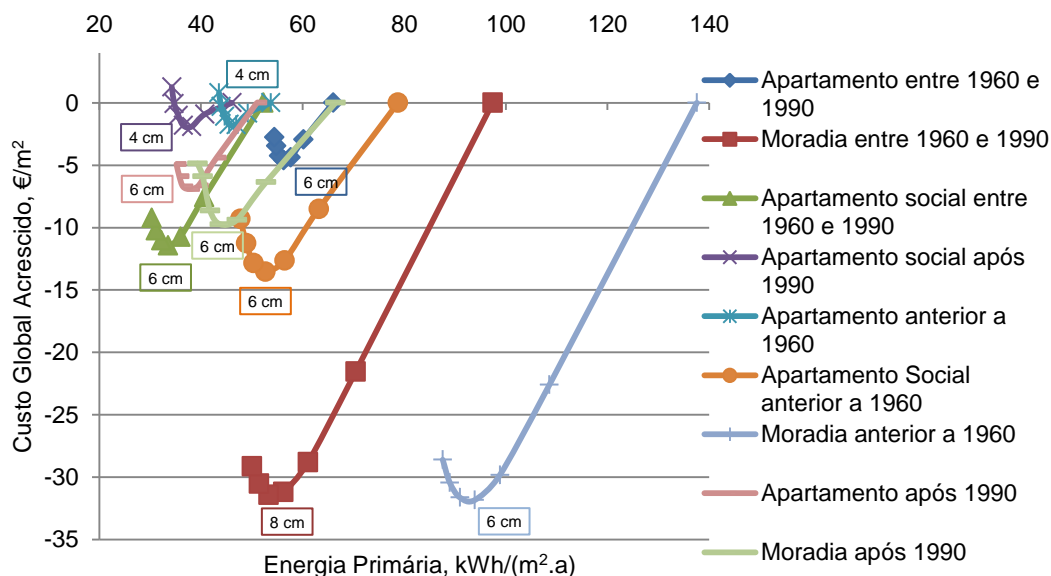


Figura 21 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de isolamento térmico, para os diferentes casos de estudo, na região do Porto.

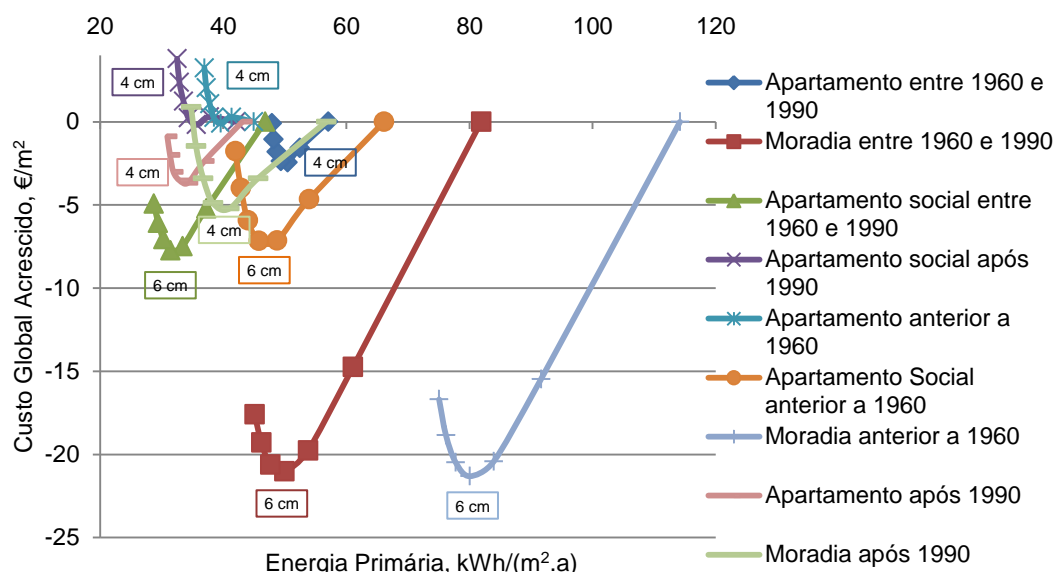


Figura 22 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de isolamento térmico, para os diferentes casos de estudo, na região de Lisboa.

De acordo com os resultados obtidos é possível verificar que em todos os casos e para as três regiões climáticas estudadas existe um ponto de custo-ótimo, não correspondendo este aos casos de referência. Como seria de esperar verifica-se que quanto maior o nível de isolamento, menor a energia primária necessária para suprir as necessidades de climatização para cada habitação, independentemente da tipologia.

A região de Bragança (ver Figura 20) é, devido principalmente ao rigor da estação de aquecimento, a que apresenta maiores necessidades de energia e como tal é a que mais beneficia com a aplicação de isolamento na envolvente opaca exterior dos elementos verticais e horizontais. O consumo energético das habitações nesta região é tão elevado, comparativamente às restantes regiões estudadas, que os custos associados ao isolamento térmico são grandemente compensados durante o ciclo de vida dos edifícios.

As poupanças energéticas e custos associados para os casos de estudo, na região de Bragança, resultam num custo-ótimo correspondente ao nível de isolamento de 10 cm para as moradias correspondentes aos períodos de construção anteriores à década de 90 e de 8 cm de isolamento térmico para a moradia mais recente. Relativamente aos casos da tipologia de apartamento verifica-se que a maior parte atinge o custo ótimo para a solução de 8 cm de isolamento, sendo exceção o apartamento social correspondente ao período correspondido entre 1960 e 1990 (com 10 cm de isolamento como ponto de menor custo).

Através dos resultados, seria de esperar que os edifícios construídos mais recentemente não necessitassem de graus de isolamento tanto ou mais elevados que as restantes habitações. As restantes características construtivas presentes na estrutura original dos edifícios pós década de 90 são energeticamente mais rigorosas e vocacionadas para a poupança energética, como é o exemplo da utilização de vidro duplo nos vãos envidraçados. O uso de elevados níveis de isolamento para estas habitações não seria economicamente compensador perante a poupança energética daí resultante.

Relativamente aos apartamentos típicos do período compreendido entre a década de 60 e 90, verifica-se que estes compensam, em termos económicos, na aplicação de um elevado nível de isolamento. Tendo em conta que a área a isolar nestes casos é inferior, comparativamente com os restantes casos de estudo, os custos associados ao isolamento térmico e a poupança energética consequente compensam a aplicação do nível de isolamento observado.

As restantes regiões climáticas são caracterizadas por menores consumos de energia primária, e pontos de custo-ótimo associados a níveis de isolamento térmico mais reduzidos. As curvas de

custo associadas às regiões do Porto e Lisboa, apresentadas na Figura 21 e Figura 22, respetivamente, permitem uma melhor visualização dos pontos economicamente mais favoráveis.

Os casos aplicados à região de Lisboa apresentam, na sua generalidade, mais pontos à esquerda do custo-ótimo, e como tal são muitas a soluções que não representam o ótimo económico. Existem dois casos de estudo, que nestas condições apenas apresentam um ponto (correspondente à solução de 4 cm de isolamento) em que o custo global acrescido é inferior ao custo associado aos respetivos casos de referência. São eles o apartamento social representativo do período pós anos 90 e o apartamento anterior a 1960.

A Tabela 25 sumariza os resultados obtidos para os ótimos económicos associados a cada caso de estudo. Encontram-se representados os valores ótimos para a espessura de isolamento juntamente com os valores dos coeficientes de transmissão térmica das fachadas correspondentes.

Tabela 25 – Resumo dos pontos de custo-ótimo para a solução de isolamento térmico.

Período de construção	Tipologia	Bragança		Porto		Lisboa	
		U (W/(m ² .K))	e_{isol} (m)	U (W/(m ² .K))	e_{isol} (m)	U (W/(m ² .K))	e_{isol} (m)
Até 1960	Moradia (T2)	0,32	0,10	0,47	0,06	0,47	0,06
	Apartamento Social (T3)	0,36	0,08	0,44	0,06	0,44	0,06
	Apartamento (T3)	0,33	0,08	0,49	0,04	0,49	0,04
De 1960 a 1990	Moradia (T5)	0,31	0,10	0,36	0,08	0,44	0,06
	Apartamento Social (T3)	0,32	0,10	0,46	0,06	0,46	0,06
	Apartamento (T3)	0,34	0,08	0,41	0,06	0,52	0,04
		0,41		0,51		0,68	
Após 1990	Moradia (T5)	0,33	0,08	0,39	0,06	0,49	0,04
	Apartamento Social (T3)	0,33	0,08	0,49	0,04	0,49	0,04
	Apartamento (T3)	0,36	0,08	0,45	0,06	0,57	0,04

5.6.2 Vãos envidraçados

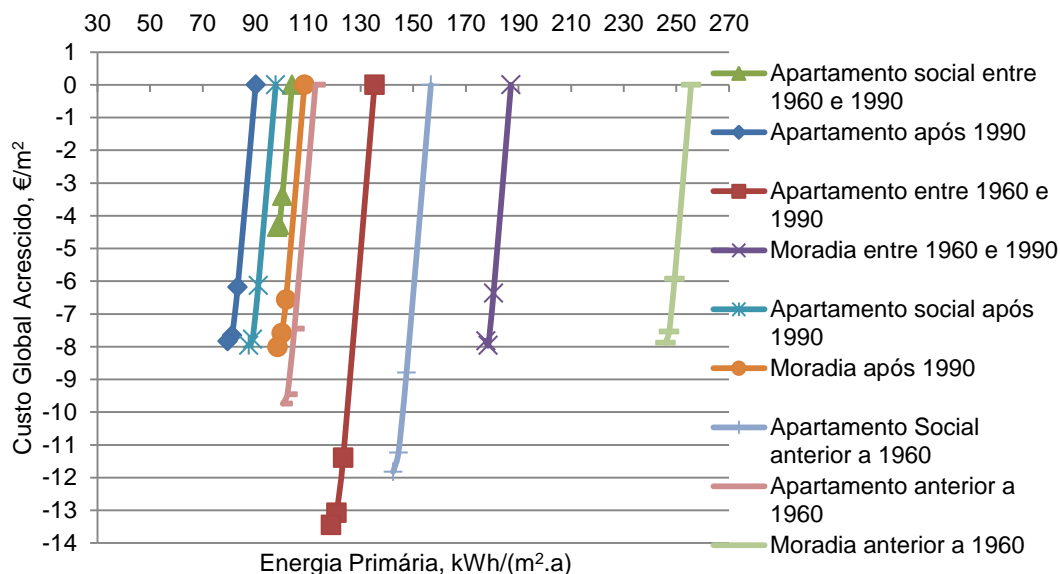


Figura 23 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de vidros, para os diferentes casos de estudo, na região de Bragança.

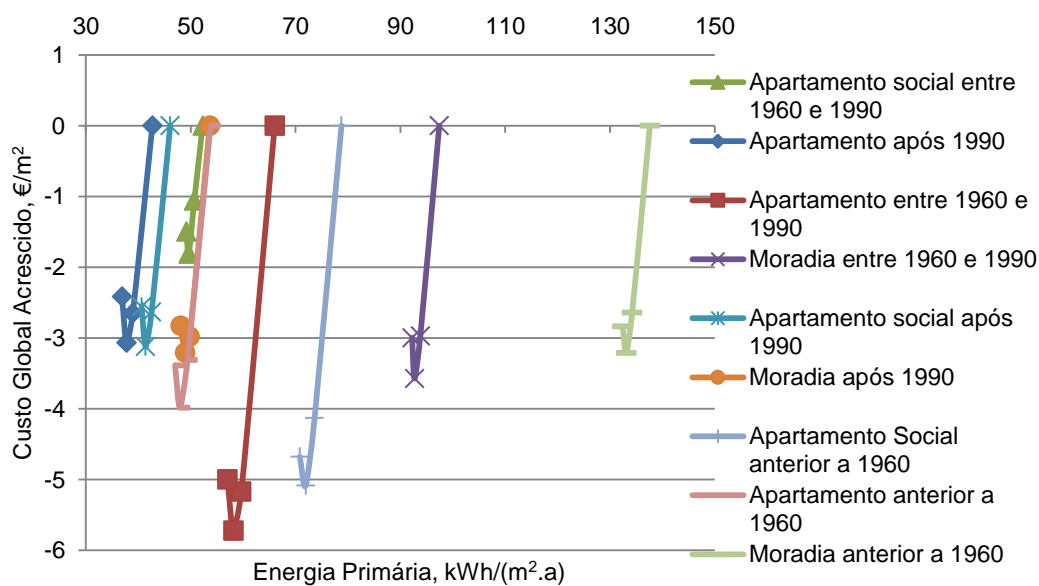


Figura 24 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de vidros, para os diferentes casos de estudo, na região do Porto.

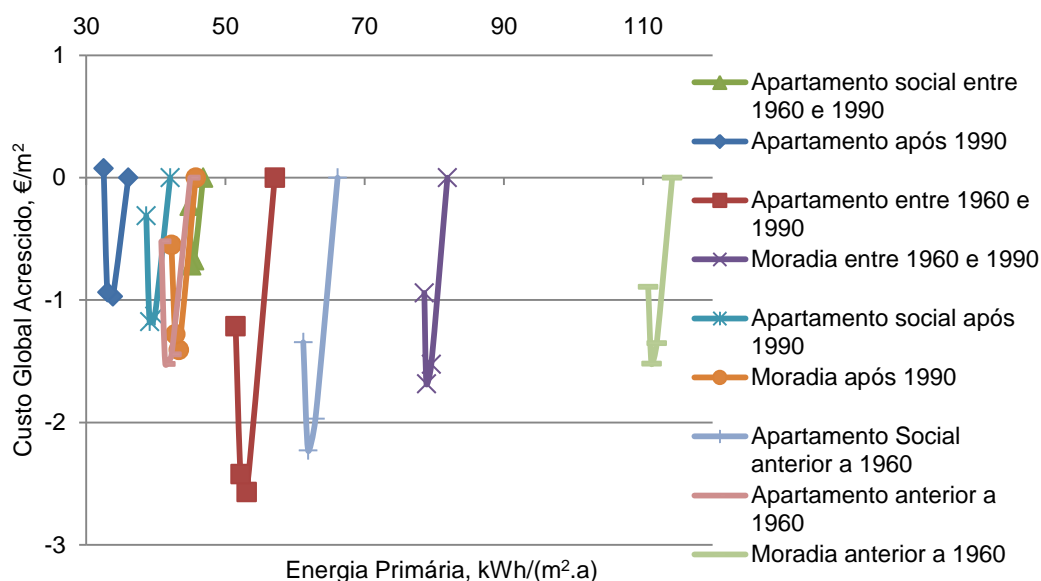


Figura 25 – Curvas de custo formadas por diferentes soluções de vidros, para os diferentes casos de estudo, na região de Lisboa.

Devido ao menor número de diferentes soluções construtivas, as curvas de custo foram construídas com um menor número de pontos comparativamente com os casos em que se aplicou a medida do isolamento térmico.

A falta de pontos impediu a formação de uma curva que permitisse deduzir o ponto correspondente ao custo-ótimo para a maioria dos casos na região de Bragança. Tal sugere que deveriam ter sido considerados mais pontos correspondentes a soluções mais restritivas do ponto de vista energético, no entanto os pontos considerados foram os possíveis tendo em conta que se trata de soluções cujos valores de coeficientes de transmissão térmica se encontram tabelados. Pela observação da Figura 23 verifica-se que o ponto, economicamente e energeticamente mais favorável, não se sabendo se corresponde ao ótimo económico, é representado pela solução de vidro duplo 6/16/6 de baixa emissividade. A única exceção corresponde ao caso da moradia representativa do período de construção entre os anos 60 e 90, cujo ponto ótimo corresponde à solução de vidro duplo 6/16/6.

A hipótese de utilização de um vidro duplo, igualmente de baixa emissividade mas com ambos os vidros de maior espessura que 6 mm, corresponderia a um menor valor de coeficiente de transmissão térmica e consequentemente reduziria as necessidades energéticas das habitações. No entanto, tendo em consideração o perfil das curvas de custo observadas, poderia não ser economicamente vantajoso podendo levar à conclusão de que a solução anterior corresponderia de facto ao ponto de custo-ótimo.

Estudando os casos aplicados à região de Lisboa e Porto, é possível deduzir um ponto correspondendo ao ótimo económico para todas as habitações.

Como seria de esperar, as curvas de custo correspondentes à região de Lisboa são as mais expressivas ilustrando bem as zonas características das curvas, desde a região referente aos requisitos mínimos, passando pelo ótimo económico, e por fim a área à esquerda do ponto ótimo, representativa dos edifícios de necessidades quase nulas de energia.

Pela observação da curva de custo referente ao apartamento característico do período pós década de 90 da Figura 25, verifica-se que a solução correspondente ao vidro duplo de baixa emissividade não é economicamente vantajosa relativamente à solução de vidro simples.

A Tabela 26 apresenta as soluções ótimas do ponto de vista económico para os vão envidraçados juntamente com os respetivos valores dos coeficientes de transmissão térmica.

Tabela 26 – Resumo dos pontos de custo-ótimo para a solução dos vãos envidraçados.

Período de construção	Tipologia	Bragança		Porto		Lisboa	
		U (W/(m ² .K))	Tipo de vidro	U (W/(m ² .K))	Tipo de vidro	U (W/(m ² .K))	Tipo de vidro
Até 1960	Moradia (T2)	2,00	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm
	Apartamento Social (T3)	2,00	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm
	Apartamento (T3)	2,00	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm
De 1960 a 1990	Moradia (T5)	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm
		2,50		2,50		2,50	
	Apartamento Social (T3)	2,00	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm
		2,40		2,50		2,50	
	Apartamento (T3)	2,70	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm	2,90	Vidro duplo, 6/16/6 mm	3,10	Vidro duplo, 4/6/6 mm
		3,70		4,00		4,50	
Após 1990	Moradia (T5)	2,00	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm	2,50	Vidro duplo, 4/6/6 mm
		2,40		2,50		2,90	
		2,70		2,90		3,10	
		2,30		2,60		2,80	
		3,30		3,50		3,90	
	Apartamento Social (T3)	2,00	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm	2,20	Vidro duplo, 6/16/6 mm
	Apartamento (T3)	2,30	Vidro duplo (b.e.), 6/16/6 mm	2,50	Vidro duplo, 6/16/6 mm	2,70	Vidro duplo, 4/6/6 mm

5.7 Casos de estudo com soluções de custo-ótimo

Nesta secção do trabalho pretende-se estudar a influência das soluções correspondentes ao ótimo económico, apresentadas na secção 5.6, nas necessidades de aquecimento e de arrefecimento.

A análise energética teve em consideração os casos de estudo com aplicação simultânea das soluções de isolamento térmico e de vãos envidraçados representativos do ótimo económico.

Os resultados foram estimados a partir da metodologia correspondente ao RCCTE de 2006 e ao novo RCCTE.

A aplicação da metodologia que se encontra atualmente em vigor, apenas difere, relativamente aos casos de estudo que apresentam as soluções construtivas originais, nos coeficientes de transmissão térmica que correspondem ao ótimo económico.

A aplicação da metodologia do novo RCCTE, enunciada na secção 4.4.2, tem em conta os coeficientes de transmissão térmica correspondentes ao ótimo económico e ainda os coeficientes de transmissão térmica lineares de referência. Tendo em consideração que, para aplicação do regulamento térmico de 2006, não se calculou o valor dos coeficientes de transmissão térmica correspondentes ao pavimento em contacto com o solo, para os casos de estudo correspondentes às moradias, considerou-se, para aplicação do novo regulamento térmico, o valor de referência que é comum para todas as regiões climáticas. Todos os restantes fatores relevantes para a aplicação desta metodologia mantêm-se constantes. Os valores de referência utilizados encontram-se no Anexo A.

A Figura 26 e Figura 27 apresentam, respetivamente, os resultados obtidos para as regiões de Bragança e Lisboa. Das três regiões estudadas (Bragança, Porto e Lisboa) estas são as que apresentam resultados mais significativos para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Os resultados relevantes para a análise efetuada encontram-se disponíveis para consulta no Anexo E.

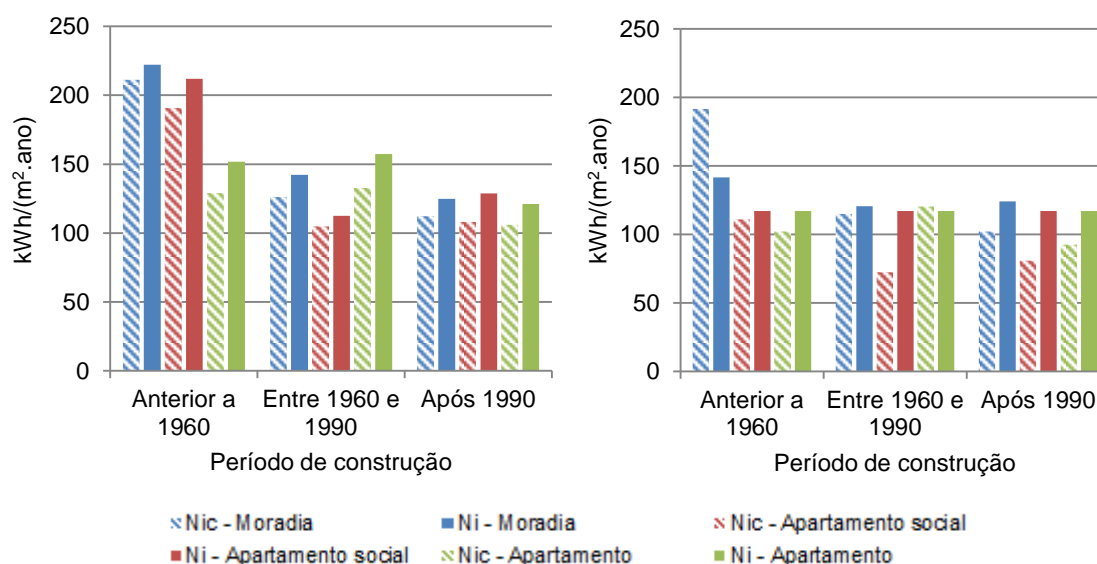


Figura 26 – Resultados das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e respetivos valores limites para a região de Bragança. À esquerda, os resultados referentes à aplicação do novo RCCTE. A ilustração da direita representa o RCCTE de 2006.

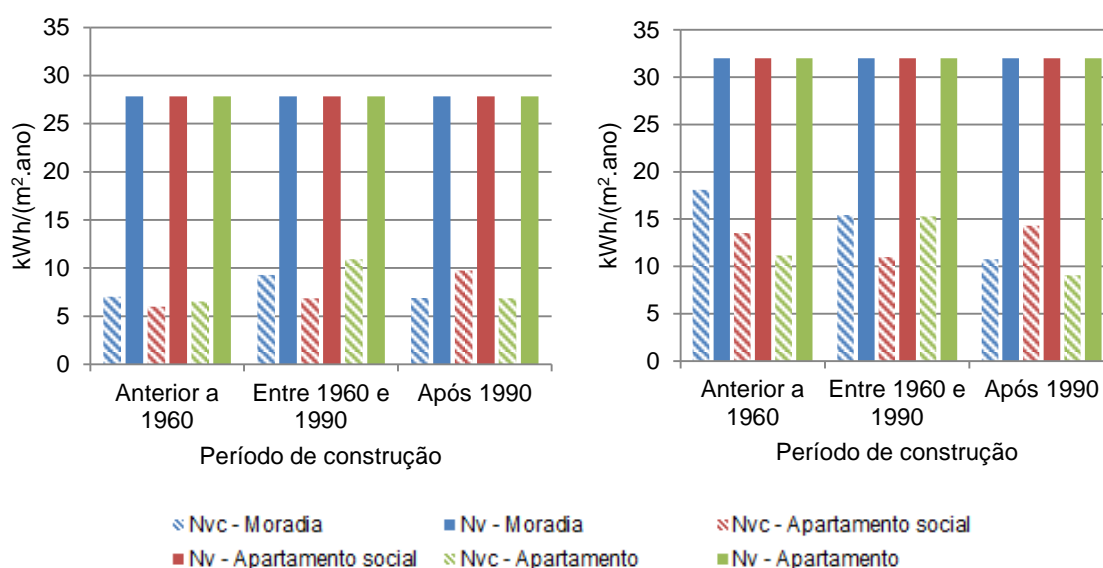


Figura 27 – Resultados das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento e respetivos valores limites para a região de Lisboa. À esquerda, os resultados referentes à aplicação do novo RCCTE. A ilustração da direita representa o RCCTE de 2006.

Os resultados obtidos permitiram verificar que a aplicação dos casos com as soluções construtivas correspondentes ao ótimo económico leva à redução das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento quando comparando com os casos de estudo com as suas soluções construtivas originais (ver secção 4.5).

A utilização das mesmas soluções construtivas, e consequentemente dos mesmos coeficientes de transmissão térmica, nas diferentes metodologias de cálculo, levou à conclusão de que seguindo o novo RCCTE as necessidades nominais de energia para aquecimento e respetivos valores máximos admissíveis são superiores quando comparando com os resultados obtidos a partir do RCCTE de 2006.

Tendo em consideração que a nova metodologia de cálculo considera perdas pelas pontes térmicas e ainda perdas pela envolvente interior verifica-se que as necessidades para aquecer são superiores. No entanto, os casos originais apresentam maiores necessidades e menores valores limites, não cumprindo esses limites, ao contrário do que acontece com a aplicação do novo regulamento.

Tal como se verificou numa fase anterior deste trabalho, as necessidades de energia para arrefecimento, segundo a nova metodologia de cálculo, são inferiores aos resultados obtidos através da aplicação da metodologia atualmente em vigor, devido, em parte às mesmas razões enunciadas para o aquecimento.

Comparando os resultados dos casos com as soluções construtivas originais com os casos com as soluções representativas do ótimo económico aplicado ao RCCTE, atualmente em vigor, verifica-se que, para a região de Bragança e Porto, as necessidades de energia para arrefecimento são superiores quando adotando as soluções de custo ótimo. A região de Lisboa apresenta resultados semelhantes.

Os casos originais apresentam soluções construtivas com maiores valores de coeficiente de transmissão térmica na envolvente opaca e vãos envidraçados, em oposição com os casos de soluções construtivas representativas do ótimo económico, e como consequência o fluxo de calor entre o interior e exterior de habitação é mais significativo levando à menor necessidade de arrefecer o meio ambiente.

6. Conclusões

Com o intuito de contribuir para o desenvolvimento do conceito de edifícios com necessidades reduzidas de energia para aquecimento e arrefecimento em edifícios de habitação em Portugal, procedeu-se ao estudo da situação atual em que se encontra o consumo energético no sector residencial no País. Para este fim, aplicaram-se metodologias diferentes de forma a se conseguir estimar as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento de habitações de referência, consideradas habitações “tipo” a nível nacional.

Após a definição das habitações de referência foi possível estudar a aplicação de medidas, essencialmente ao nível da utilização de diferentes materiais de construção com base em diferentes metodologias de simulação energética distintos, nessas mesmas habitações, cujos resultados permitiram retirar algumas conclusões.

A primeira abordagem (*top-down*) seguida neste trabalho, consistiu em desenvolver diferentes modelos com o auxílio de um *software* que integra o programa de simulação energética *EnergyPlus*. Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento dos modelos construídos encontram-se próximas dos valores resultantes de um inquérito baseado a nível nacional e no qual essa secção do trabalho foi fundamentada. Os pressupostos assumidos para a simulação dos modelos resultaram no entanto numa maior discrepância a nível dos resultados associados ao consumo elétrico para aquecimento;
- as medidas estudadas ao nível da envolvente exterior opaca e vãos envidraçados permitiram inferir quais as combinações mais vantajosas para a redução do consumo elétrico na estação de aquecimento e arrefecimento tendo em conta diferentes tipologias de habitação e regiões climáticas também distintas;
- a tipologia de habitação referente ao edifício unifamiliar revelou ser a que resulta num maior consumo de energia para aquecimento e num menor consumo para arrefecimento, em oposição do que se deduziu em relação à fração autónoma do edifício multifamiliar. Estes resultados devem-se essencialmente às maiores perdas de calor por parte da tipologia de moradia em contraste com a tipologia de apartamento.

A segunda abordagem (*bottom-up*) permitiu a comparação de diferentes metodologias de cálculo das necessidades para aquecimento e arrefecimento com base no Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios. Ao contrário do estudo anterior, foram analisadas nove habitações, de diferentes tipologias, para diferentes regiões climáticas. As diferentes metodologias consistiram na aplicação da metodologia presente no regulamento atualmente em vigor, tendo em consideração duas situações distintas: aplicação das soluções construtivas originais das habitações e aplicação dos valores de referência alusivos ao RCCTE de 2006. Foi ainda aplicada a metodologia relativa ao futuro RCCTE, que se encontra ainda em fase de análise, tendo em consideração soluções construtivas representativas dos valores de referência aí preconizados. Por último, foi levada a cabo uma outra abordagem, que resulta da aplicação da metodologia do RCCTE de 2006 mas, considerando valores de referência previstos no futuro regulamento que, tal como se referiu, ainda se encontra em desenvolvimento.

As diferentes metodologias permitiram estabelecer as seguintes conclusões:

- a utilização de valores de referência para os coeficientes de transmissão térmica, dispostos no regulamento térmico em vigor (RCCTE de 2006), permitem, na maioria dos casos de estudo, a redução das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, comparativamente aos resultados obtidos para os casos de estudo com as características construtivas originais. Tal se justifica pelo facto dos valores de referência serem inferiores aos valores correspondentes às características originais e como tal os edifícios estudados não se encontram próximos do que se considera de referência;

- alguns dos casos de estudo apresentam, no entanto, soluções construtivas que são mais eficientes energeticamente, sem a aplicação dos valores de referência. Ou seja, algumas construções já são caracterizadas por valores de coeficientes de transmissão térmica inferiores aos de referência estabelecidos pelo RCCTE de 2006. São exemplos os casos que correspondem à tipologia de apartamento e moradia construídos após a década de 90.
- as condições de referência e metodologia adotada pelo novo regulamento conduzem, na generalidade dos casos de estudo, a menores necessidades para aquecimento e arrefecimento e consequentemente a menores consumos energéticos nas habitações portuguesas;
- a utilização de valores de referência para os coeficientes de transmissão térmica lineares, de acordo com o novo regulamento, pode levar a um aumento das necessidades de energia para aquecimento, como foi observado nalguns dos casos de estudo, comparativamente ao RCCTE atual;

Esta abordagem incide principalmente sobre as soluções de isolamento térmico na envolvente opaca e vãos envidraçados, originando diferentes resultados para a estação de aquecimento e arrefecimento. Tendo presente que as soluções com maiores níveis de isolamento térmico, por si só, são muito adequadas para a estação de aquecimento poderão não ser, quando sendo a única estratégia, as mais adaptadas para a estação de arrefecimento e, com o fim de estudar o efeito de tais soluções no verão, recorreu-se a uma última abordagem, que resulta de uma combinação entre a metodologia de cálculo atual (RCCTE de 2006) e os novos valores de referência. Esta abordagem teve como consequência o seguinte:

- ao considerar menores valores para os coeficientes de transmissão térmica, comparativamente com os que se encontram no regulamento em vigor, a última abordagem resultou, na maioria dos casos, em necessidades de energia para arrefecimento mais elevadas. Visto que não considera as perdas pela envolvente interior nem pelas pontes térmicas, como acontece com a nova metodologia, os valores de referência mais restritos diminuem as perdas, e como consequência aumentam as necessidades brutas de arrefecimento.

Comparando os resultados obtidos a partir de ambas as abordagens referidas (*top-down* e *bottom-up*) é possível ainda tecer algumas considerações.

Tendo em consideração que a primeira abordagem envolveu a análise e tratamento de dados estatísticos a nível nacional, existem diversos fatores que podem não traduzir a realidade das habitações existentes, como a utilização de dados desatualizados, pressupostos assumidos por falta de informação disponível, entre outros. A comparação com casos reais, de que trata a segunda abordagem, permitiu verificar a dificuldade em, a partir de uma abordagem geral, construírem-se modelos de edifícios de referência representativos das condições médias da habitação.

Através da análise dos resultados, verificou-se, como seria de esperar, que existe uma discrepância entre os resultados obtidos pelas duas abordagens, sendo que, os casos de estudo construídos após 1990 apresentam valores de necessidades de energia próximos dos valores do Instituto Nacional de Estatística. Tal facto poderá ser atribuído a que os dados estatísticos considerados são também referentes a períodos pós anos 90.

Os casos de estudo, nos quais a segunda abordagem se focou, foram ainda analisados na perspetiva do custo-ótimo. Foram estudadas diferentes medidas de poupança energética associadas à aplicação de isolamento térmico e de diferentes tipos de vidros, considerando três regiões climáticas distintas. Essa secção do trabalho permitiu estabelecer quais as soluções que correspondem ao ótimo económico e, delinear estratégias para reduzir ainda mais o consumo energético. Com base nessa análise económica e energética retiraram-se algumas conclusões:

Região de Bragança:

- correspondendo a uma região climática de inverno mais rigorosa, demonstrou ser a região onde compensa optar por soluções à partida mais dispendiosas, visto que a poupança energética e consequentemente a poupança na fatura da energia elétrica irá compensar o investimento inicial;
- no caso das medidas associadas ao isolamento térmico, atingiu-se o ótimo económico através das curvas de custo. O mesmo não se passou com os vãos envidraçados, em que seria ainda possível considerar outras soluções e assim aumentar os pontos que caracterizam as curvas;

Regiões do Porto e Lisboa:

- a região do Porto e principalmente de Lisboa potenciam a construção de figuras ainda mais curvilíneas permitindo assim a melhor interpretação dos pontos associados ao custo-ótimo;
- a idade das habitações pode nalguns casos, sendo mais expressivo na aplicação da medida associada aos vãos envidraçados, afetar o consumo de energia primária e a diferença de custos associados ao edifício de referência. Quanto mais recente for a habitação menor será o consumo de energia primária e menor a diferença de custos entre a habitação com a medida de poupança estudada e a habitação considerada como referência;
- a presença de pontos à esquerda do ponto ótimo nas curvas de custo indicam a existência de soluções que seriam mais eficientes energeticamente e que aproximariam os edifícios nacionais do patamar dos edifícios com necessidades quase nulas de energia para aquecimento e arrefecimento. Verifica-se no entanto que economicamente essas soluções não são as ideais podendo mesmo não ser exequíveis do ponto de vista económico.

Conhecendo os valores dos coeficientes de transmissão térmica associados às soluções de poupança energética que correspondem ao ótimo económico e os valores de referência que são apresentados no novo regulamento térmico, ainda em desenvolvimento, foi possível concluir que os valores são próximos, e como tal que o novo regulamento poderá ser aplicado numa perspetiva de redução dos consumos energéticos mas, de uma forma economicamente viável.

A partir da análise de custo-ótimo, é possível encontrar quais os valores para os coeficientes de transmissão térmica que melhor poderão vir a caracterizar um edifício nZEB.

Na generalidade dos casos de estudo, para a região de Bragança, espessuras de isolamento para a envolvente opaca superiores a 8 e 10 cm, isto é, valores de U inferiores aos associados aos ótimos económicos, compreendidos entre 0,31 W/(m².K) e 0,41 W/(m².K) para as fachadas e entre 0,32 W/(m².K) e 0,39 W/(m².K) para as coberturas, e soluções de envidraçados com valores de U inferiores ao intervalo compreendido entre 2,00 W/(m².K) e 3,70 W/(m².K) (vidros duplos com baixa emissividade, 6/16/6 mm), correspondem a soluções próximas dos edifícios com necessidades quase nulas de energia.

Os resultados para as regiões representativas das zonas climáticas I1 e I2 (Lisboa e Porto) são semelhantes em termos de valores associados ao ótimo económico. Nestes casos, as espessuras de isolamento térmico correspondentes ao ótimo económico são de 4, 6 e 8 cm, dependendo do caso de estudo, com valores de U compreendidos entre os 0,36 W/(m².K) e 0,68 W/(m².K), para as fachadas, e os 0,38 W/(m².K) e 0,52 W/(m².K) para as coberturas das moradias, concluindo que os edifícios com necessidades quase nulas de energia devem ser caracterizados por requisitos mais exigentes que os obtidos, para os coeficientes de transmissão térmica. Relativamente aos envidraçados, devem ser privilegiadas soluções mais eficientes energeticamente que as soluções de vidro duplo, 6/16/6 mm.

Relativamente às necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, conclui-se que, numa perspetiva de alcançar os edifícios nZEB, estas devem ser inferiores às calculadas

segundo a metodologia de cálculo do novo regulamento térmico com os valores de coeficientes de transmissão térmica associados ao ótimo económico. Como tal, os resultados da aplicação de valores de U associados ao custo ótimo, podem ser considerados como valores limite, sendo que os valores compreendidos abaixo desses valores máximos permitem reduzir as necessidades de energia nas habitações e aproximar do conceito nZEB.

6.1 Desenvolvimentos futuros

Os assuntos discutidos ao longo desta dissertação têm a possibilidade de serem novamente investigados em futuros trabalhos tendo em conta que se perspetiva uma atualização da informação relevante para os tópicos desenvolvidos.

Como trabalho futuro, considera-se pertinente a realização de estudos semelhantes ao considerado no capítulo referente à abordagem “*top-down*” tendo por base estatísticas nacionais mais recentes, visto que alguns dos dados utilizados se encontram desatualizados.

Os casos de estudo utilizados na abordagem “*bottom-up*” e na análise de custo ótimo são referentes e representativos da região de Lisboa, sendo assim, estes estudos podem, no futuro, ser realizados para casos concretos representativos das diferentes regiões de Portugal.

Em virtude da grande variabilidade em termos da evolução de taxas de juro, dos preços da energia, entre outras variáveis económicas, e dos materiais de construção, torna-se pois necessária uma análise de custo-ótimo que acompanhe essas alterações e eventuais modificações no sector da construção, nomeadamente no que se refere aos valores dos coeficientes de transmissão térmica, e nas normas nacionais e internacionais. Uma análise desta natureza, em constante atualização, permitirá inferir novos valores correspondentes ao ótimo económico viabilizando a aproximação dos edifícios com necessidades quase nulas de energia.

7. Referências

- ASHRAE. (2011, Setembro 14). "Energy.gov." 2012, from http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=369/pagename=alpha_list.
- Bragança, L., de Almeida, M. G., et al. (2007). "State of the art: Portugal." *Cost C16, improving the quality of existing urban building envelopes: State of the art 1*: 137.
- CCE (s.d.). Isolamento de edifícios. *Notícias da Energia*, Ministério da Indústria e Energia.
- Decreto-Lei n.º 80/2006 (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. *Diário da República*. Lisboa, Portugal, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- DesignBuilder Software Ltd. (2010). "DesignBuilder." 2012, from <http://www.designbuilder.co.uk>.
- Despacho n.º 17313/2008 (2008). *Diário da República*. Lisboa, Portugal, Ministério da Economia e Inovação.
- Directorate General for Energy (2011). Meeting Document for the Expert Workshop on the comparative framework methodology for cost optimal minimum energy performance requirements In preparation of a delegated act in accordance with Art 290 TF EU. Brussels, European Commission.
- EDP Energias de Portugal. (2009). "edp." 2012, from <http://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/BTN/Pages/TarifasBTNate20.7kVA.aspx>.
- Entrop, A.&Brouwers, H. (2010). "Assessing the sustainability of buildings using a framework of triad approaches." *Journal of Building Appraisal* **5**(4): 293-310.
- European Commission (2010). "Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)." *Official Journal of the European Union* **153**: 13-35.
- European Commission (2012). Supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast). Brussels, Author.
- Gonçalves, H., Camelo, S., et al. (2005). Edifícios Bioclimáticos de Construção Social e Edifícios Sociais em Portugal. *Los Edifícios Bioclimáticos en los Países de Ibero América*. Lisboa, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação: 67-74.
- Gonçalves, H.&Graça, J. M. (2004). *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. Amadora, Lisboa, Portugal, DGGE.
- INE (1997). Indicadores de Conforto. Lisboa, Autor.
- INE (2000). O Inquérito à Habitação 1998. Lisboa, Autor.
- INE (2011). Estatísticas da Construção e Habitação 2010. Lisboa, Instituto Nacional de Estatística.
- INE&DGEG (2011). Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010. Lisboa, Autores.
- ISO 13790:2008 (2008). Energy performance of buildings - calculation of energy use for space heating and cooling.
- ITeCons. (2006). *ITeCons*, 2012, from <http://www.itecons.uc.pt>.
- Kurnitski, J., Saari, A., et al. (2011). "Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation." *Energy and Buildings* **43**: 3279-3288.
- McLoughlin, F., Duffy, A., et al. (2011). "Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study." *Energy and Buildings* **48**: 240-248.
- Moita, F. (2010). *Energia Solar Passiva*. Lisboa, Argumentum.
- Porto Editora. (2012). *Infopédia*, 2012, from [http://www.infopedia.pt/\\$portugal](http://www.infopedia.pt/$portugal).
- Santos, C.&Matias, L. (2009). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios - ITE 50*. Lisboa, LNEC.
- Santos, C.&Rodrigues, R. (2009). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios - ITE 54*. Lisboa, LNEC.
- TABULA Project Team (2010). Use of Building Typologies for Energy Performance Assessment of National Building Stocks. Existent Experiences in European Countries and Common Approach. Darmstadt, Germany.
- The Buildings Performance Institute Europe (2011). *Cost optimality discussing methodology and challenges within the recast Energy Performance of Buildings Directive*. Belgium, Author.
- Thomsen, K. E.&Wittchen, K. B. (2008). European national strategies to move towards very low energy buildings. Hørsholm, Denmark, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI.
- Top - Informática Lda. (2012). "gerador de preços." *CYPE Software para Engenharia e Construção*, 2012, from <http://geradordeprecos.cype.pt>.
- Zirngibl, J.&François, C. (2010). Economic evaluation procedure for energy systems in buildings. *Information paper on EN 15459*. France, Energy Performance of Buildings.

Anexo A. Coeficientes de transmissão térmica de referência

Tabela 27 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e vãos envidraçados, em $W/(m^2.K)$.

Zona corrente da envolvente		Zona climática					
		Regulamento em vigor			Entrada do novo regulamento		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
Em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas superior a 0,7	Elementos opacos verticais	0,70	0,60	0,50	0,50	0,40	0,35
	Elementos opacos horizontais	0,50	0,45	0,40	0,40	0,35	0,30
Em contacto com outros edifícios ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas inferior ou igual a 0,7	Elementos opacos verticais	1,40	1,20	1,00	1,00	0,80	0,70
	Elementos opacos horizontais	1,00	0,90	0,80	0,80	0,70	0,60
Elementos em contacto com o solo		-	-	-	0,50		
Vãos envidraçados		4,30	3,30	3,30	2,90	2,60	2,40

Tabela 28 - Coeficientes de transmissão térmica lineares de referência do novo regulamento, em $W/(m.K)$.

Tipo de ligação		Sistemas de isolamento		
		Isolamento interior	Isolamento exterior	Isolamento repartido ou na caixa-de-ar de parede dupla
Fachada com pavimentos térreos		0,80	0,70	0,80
Fachada com pavimento sobre o exterior ou local não aquecido	Isolamento sob o pavimento	0,75	0,55	0,75
	Isolamento sobre o pavimento	0,10	0,50	0,35
Fachada com pavimento de nível intermédio ^x		1,20	0,30 ^{xi}	1,00 ^{xii}
Fachada com varanda		1,20	1,20	1,10
Fachada com cobertura	Isolamento sob a laje de cobertura	0,10 ^{xiii}	0,70	0,60
	Isolamento sobre a laje de cobertura	1,00	0,80	1,00
Duas paredes verticais em ângulo saliente		0,10	0,40	0,50
Fachada com caixilharia	O isolante térmico da parede contacta com a caixilharia	0,10		
	O isolante térmico da parede não contacta com a caixilharia	0,25		
Zona da caixa de estores		0,30		

^x Os valores apresentados referem-se à totalidade da ligação, devendo atribuir-se 50% da perda térmica ao andar superior e 50% ao andar inferior.

^{xi} Deve-se majorar este valor quando existir tecto falso em 25%.

^{xii} Deve-se majorar este valor quando existir tecto falso em 50%.

^{xiii} Deve-se majorar este valor quando existir tecto falso em 70%.

Anexo B. Parâmetros relevantes para a aplicação do RCCTE

Os valores apresentados neste anexo são referentes ao RCCTE em vigor, ou seja de 2006, visto que os dados climáticos e restantes parâmetros necessários, referentes à nova versão do regulamento, ainda não se encontram disponíveis para consulta.

Tabela 29 – Fator de orientação

	Octante N	Octantes NE e NW	Octantes E e W	Octantes SE e SW	Octante S	Horizontal
<i>X</i>	0,27	0,33	0,56	0,84	1,00	0,89

Relativamente aos fatores que permitem o cálculo da área efetiva coletora da radiação solar tem-se o seguinte:

O fator de obstrução (F_s) representa a redução da radiação solar que incide no vão envidraçado devido ao sombreamento causado por diferentes obstáculos. Este fator pode tomar valores compreendidos entre 0 e 1, e pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$F_s = F_h \times F_o \times F_f \quad (\text{B } 1)$$

onde F_h , F_o e F_f correspondem, respetivamente, a fatores de sombreamento do horizonte, por elementos horizontais sobrepostos ao envidraçado e por elementos verticais adjacentes ao envidraçado. Os valores que estes fatores podem tomar diferem para a estação de aquecimento e de arrefecimento e encontram-se tabelados no RCCTE de 2006 (Decreto-Lei n.º 80/2006 2006).

A fração envidraçada (F_g) é dada pela razão entre a área envidraçada e a área total do vão envidraçado e depende o tipo de caixilharia, como se pode ver na Tabela 30.

Tabela 30 – Fração envidraçada para diferentes caixilharias

Tipo de caixilharia	F_g	
	Caixilho sem quadrícula	Caixilho com quadrícula
Alumínio ou aço	0,70	0,60
Madeira ou PVC	0,65	0,57
Fachadas-cortina de alumínio ou aço	0,90	-

O fator de correção (F_w) representa a redução dos ganhos solares causada pela variação das propriedades do vidro com o ângulo de incidência da radiação solar direta. Este fator toma o valor de 0,9 para vidros correntes simples e duplos para o cálculo das necessidades nominais de aquecimento. No caso da estação de arrefecimento, F_w varia com a orientação do vão envidraçado.

Tabela 31 – Fator de correção para a estação de arrefecimento

Tipo de vidro	F_w				
	N	NE e NW	E e W	SE e SW	S
Simples	0,85	0,90	0,90	0,90	0,80
Duplo	0,80	0,85	0,85	0,85	0,75

Para o cálculo do fator solar dos vãos envidraçados na estação de aquecimento (g_i), considerou-se que, de maneira a maximizar o aproveitamento da radiação, os dispositivos de proteção solar estariam sempre abertos. Neste caso apenas interessa o valor do fator solar do envidraçado ($g_{\perp,vi}$), sendo que deve ser considerada ainda a existência de cortinas interiores muito transparentes e de cor clara. Sendo assim os valores adotados são de 0,70 para vidro simples incolor e 0,63 para vidro duplo incolor.

O fator solar para a estação de arrefecimento (g_v), deve ter em conta os dispositivos de proteção solar ativos. Considerou-se que o fator solar do vão envidraçado é dado pela soma de 70% do fator solar do vão envidraçado com a proteção solar ativa e 30% do fator solar do vão envidraçado.

Tabela 32 – Valores da intensidade média da radiação solar e da temperatura exterior média na estação de arrefecimento para cada região em estudo.

Região	$\theta_{ext,v}$ (°C)	I_r (kWh/m ²)								
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Horizontal
Lisboa	23	200	340	470	460	380	460	470	340	820
Faro	23	200	340	470	460	380	460	470	340	820
Évora	23	210	330	460	460	400	470	460	330	820
Coimbra	19	200	320	450	470	420	470	450	320	790
Porto	19	200	300	420	430	380	430	420	300	730
Bragança	19	200	320	450	470	420	470	450	320	790

Anexo C. Tabelas de resultados da abordagem “bottom-up”

Tabela 33 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em kWh/(m².ano), na região de Bragança.

Ano de construção	Tipologia de habitação	Casos reais em termos de U				Casos U_{ref} RCCTE atual				Casos U_{ref} novo RCCTE				Casos ambos os RCCTE			
		N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v
Antes de 1960	Moradia	313,03	141,62	3,55	18,00	201,48	141,62	4,27	18,00	170,57	181,60	0,61	15,42	170,57	181,60	3,51	15,42
	Apartamento Social	192,78	117,08	1,40	18,00	137,15	117,08	1,71	18,00	195,38	216,42	0,24	15,42	195,38	216,42	2,34	15,42
	Apartamento	138,60	117,08	1,24	18,00	121,75	117,08	1,33	18,00	127,50	150,29	0,42	15,42	127,50	150,29	1,74	15,42
Entre 1960 e 1990	Moradia	229,24	120,48	2,56	18,00	140,19	120,48	3,44	18,00	121,99	137,99	0,88	15,42	121,99	137,99	2,87	15,42
	Apartamento Social	127,13	117,08	1,62	18,00	84,01	117,08	1,88	18,00	104,43	112,18	0,50	15,42	104,43	112,18	2,23	15,42
	Apartamento	165,83	117,08	1,77	18,00	124,73	117,08	2,64	18,00	114,83	139,36	1,31	15,42	114,83	139,36	3,47	15,42
Após 1990	Moradia	124,21	123,99	1,70	18,00	126,13	123,99	1,51	18,00	114,29	126,99	0,44	15,42	114,29	126,99	1,54	15,42
	Apartamento Social	118,64	117,08	2,36	18,00	97,89	117,08	2,59	18,00	108,80	129,47	0,92	15,42	108,80	129,47	3,29	15,42
	Apartamento	102,20	117,08	1,00	18,00	114,62	117,08	0,86	18,00	109,18	124,10	0,459	15,42	109,18	124,10	1,13	15,42

Tabela 34 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em kWh/(m².ano), na região de Coimbra.

Ano de construção	Tipologia de habitação	Casos reais em termos de U				Casos U_{ref} RCCTE atual				Casos U_{ref} novo RCCTE				Casos ambos os RCCTE			
		N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v
Antes de 1960	Moradia	150,61	74,75	3,55	18,00	118,55	74,75	3,41	18,00	94,37	104,27	0,40	15,42	94,37	104,27	3,11	15,42
	Apartamento Social	85,25	62,17	1,40	18,00	70,25	62,17	1,26	18,00	94,93	113,78	0,23	15,42	94,93	113,78	1,91	15,42
	Apartamento	57,08	62,17	1,24	18,00	61,59	62,17	1,01	18,00	59,79	79,97	0,34	15,42	59,79	79,97	1,48	15,42
Entre 1960 e 1990	Moradia	105,77	63,91	2,56	18,00	73,53	63,91	2,73	18,00	59,43	73,64	0,73	15,42	59,43	73,64	2,52	15,42
	Apartamento Social	56,72	62,17	1,62	18,00	42,38	62,17	1,58	18,00	50,20	57,08	0,47	15,42	50,20	57,08	2,00	15,42
	Apartamento	70,21	62,17	1,77	18,00	63,10	62,17	1,98	18,00	53,08	74,67	1,02	15,42	53,08	74,67	2,94	15,42
Após 1990	Moradia	53,19	65,71	1,70	18,00	67,76	65,71	1,15	18,00	57,74	69,04	0,36	15,42	57,74	69,04	1,31	15,42
	Apartamento Social	47,77	62,17	2,36	18,00	47,43	62,17	2,02	18,00	49,17	67,34	0,80	15,42	49,17	67,34	2,84	15,42
	Apartamento	41,50	62,17	1	18,00	59,60	62,17	0,65	18,00	52,55	65,76	0,367	15,42	52,55	65,76	0,95	15,42

Tabela 35 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em kWh/(m².ano), na região de Évora.

Ano de construção	Tipologia de habitação	Casos reais em termos de U				Casos U_{ref} RCCTE atual				Casos U_{ref} novo RCCTE				Casos ambos os RCCTE			
		N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v
Antes de 1960	Moradia	143,44	71,38	18,29	32,00	112,92	71,38	16,45	32,00	89,90	99,31	7,92	27,40	89,90	99,31	15,71	27,40
	Apartamento Social	81,24	59,41	13,50	32,00	66,96	59,41	11,83	32,00	90,45	108,36	5,69	27,40	90,45	108,36	12,93	27,40
	Apartamento	54,42	59,41	10,77	32,00	58,71	59,41	9,80	32,00	57,00	76,17	6,34	27,40	57,00	76,17	10,80	27,40
Entre 1960 e 1990	Moradia	100,76	61,07	15,72	32,00	70,07	61,07	14,36	32,00	56,64	70,15	9,30	27,40	56,64	70,15	13,65	27,40
	Apartamento Social	54,05	59,41	11,94	32,00	40,39	59,41	10,41	32,00	47,85	54,37	6,73	27,40	47,85	54,37	10,67	27,40
	Apartamento	66,92	59,41	14,23	32,00	60,15	59,41	14,13	32,00	50,61	71,12	11,34	27,40	50,61	71,12	15,45	27,40
Após 1990	Moradia	50,70	62,78	11,25	32,00	64,57	62,78	9,97	32,00	55,03	65,76	6,32	27,40	55,03	65,76	9,98	27,40
	Apartamento Social	45,55	59,41	13,98	32,00	45,23	59,41	12,92	32,00	46,88	64,15	9,43	27,40	46,88	64,15	13,74	27,40
	Apartamento	39,57	59,41	9,01	32,00	56,80	59,41	7,95	32,00	50,09	62,65	6,221	27,40	50,09	62,65	8,85	27,40

Tabela 36 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em kWh/(m².ano), na região de Faro.

Ano de construção	Tipologia de habitação	Casos reais em termos de U				Casos U_{ref} RCCTE atual				Casos U_{ref} novo RCCTE				Casos ambos os RCCTE			
		N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v
Antes de 1960	Moradia	109,60	55,50	18,69	32,00	86,32	55,50	16,78	32,00	68,77	75,86	8,16	27,85	68,77	75,86	16,01	27,85
	Apartamento Social	62,23	46,37	13,47	32,00	51,33	46,37	11,83	32,00	69,26	82,77	5,69	27,85	69,26	82,77	12,94	27,85
	Apartamento	41,78	46,37	10,50	32,00	45,05	46,37	9,54	32,00	43,75	58,22	6,14	27,85	43,75	58,22	10,54	27,85
Entre 1960 e 1990	Moradia	77,09	47,64	15,79	32,00	53,68	47,64	14,45	32,00	43,43	53,63	9,38	27,85	43,43	53,63	13,74	27,85
	Apartamento Social	41,40	46,37	12,11	32,00	30,98	46,37	10,53	32,00	36,67	41,60	6,83	27,85	36,67	41,60	10,79	27,85
	Apartamento	51,33	46,37	14,56	32,00	46,16	46,37	14,44	32,00	38,88	54,37	11,61	27,85	38,88	54,37	15,75	27,85
Após 1990	Moradia	38,88	48,94	11,09	32,00	49,46	48,94	9,81	32,00	42,19	50,29	6,19	27,85	42,19	50,29	9,82	27,85
	Apartamento Social	34,99	46,37	13,97	32,00	34,75	46,37	12,93	32,00	36,01	49,05	9,44	27,85	36,01	49,05	13,75	27,85
	Apartamento	30,40	46,37	9,05	32,00	43,55	46,37	7,99	32,00	38,43	47,91	6,254	27,85	38,43	47,91	8,88	27,85

Tabela 37 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em kWh/(m².ano), na região de Lisboa.

Ano de construção	Tipologia de habitação	Casos reais em termos de U				Casos U_{ref} RCCTE atual				Casos U_{ref} novo RCCTE				Casos ambos os RCCTE			
		N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v
Antes de 1960	Moradia	120,90	61,76	18,69	32,00	94,77	61,76	16,78	32,00	75,07	83,81	8,16	27,85	75,07	83,81	16,01	27,85
	Apartamento Social	67,07	51,51	13,47	32,00	54,88	51,51	11,83	32,00	74,95	91,56	5,69	27,85	74,95	91,56	12,94	27,85
	Apartamento	44,12	51,51	10,50	32,00	47,76	51,51	9,54	32,00	46,31	64,00	6,14	27,85	46,31	64,00	10,54	27,85
Entre 1960 e 1990	Moradia	84,06	52,93	15,79	32,00	57,82	52,93	14,45	32,00	46,36	58,84	9,38	27,85	46,36	58,84	13,74	27,85
	Apartamento Social	44,61	51,51	12,11	32,00	32,96	51,51	10,53	32,00	39,32	45,34	6,83	27,85	39,32	45,34	10,79	27,85
	Apartamento	54,66	51,51	14,56	32,00	48,89	51,51	14,44	32,00	40,79	59,68	11,61	27,85	40,79	59,68	15,75	27,85
Após 1990	Moradia	41,44	54,39	11,09	32,00	53,28	54,39	9,81	32,00	45,17	55,09	6,19	27,85	45,17	55,09	9,82	27,85
	Apartamento Social	36,69	51,51	13,97	32,00	36,42	51,51	12,93	32,00	37,82	53,71	9,44	27,85	37,82	53,71	13,75	27,85
	Apartamento	31,91	51,51	9,05	32,00	46,56	51,51	7,99	32,00	40,84	52,42	6,254	27,85	40,84	52,42	8,88	27,85

Tabela 38 – Resultados dos cálculos das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e respetivos valores limites para os casos de estudo, em kWh/(m².ano), na região do Porto.

Ano de construção	Tipologia de habitação	Casos reais em termos de U				Casos U_{ref} RCCTE atual				Casos U_{ref} novo RCCTE				Casos ambos os RCCTE			
		N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v
Antes de 1960	Moradia	167,24	81,96	3,05	16,00	115,43	81,96	3,70	16,00	93,46	102,97	0,44	14,64	93,46	102,97	2,94	14,64
	Apartamento Social	96,40	68,10	1,15	16,00	68,82	68,10	1,41	16,00	101,19	119,31	0,20	14,64	101,19	119,31	1,87	14,64
	Apartamento	65,48	68,10	1,09	16,00	60,08	68,10	1,17	16,00	62,56	81,95	0,35	14,64	62,56	81,95	1,47	14,64
Entre 1960 e 1990	Moradia	118,43	70,02	2,14	16,00	73,41	70,02	2,89	16,00	61,55	75,19	0,69	14,64	61,55	75,19	2,38	14,64
	Apartamento Social	63,28	68,10	1,40	16,00	41,83	68,10	1,67	16,00	52,48	59,06	0,44	14,64	52,48	59,06	1,96	14,64
	Apartamento	80,21	68,10	1,51	16,00	61,18	68,10	2,27	16,00	55,18	75,91	1,02	14,64	55,18	75,91	2,86	14,64
Após 1990	Moradia	60,06	72,00	1,55	16,00	66,14	72,00	1,35	16,00	58,52	69,34	0,38	14,64	58,52	69,34	1,34	14,64
	Apartamento Social	54,92	68,10	2,03	16,00	46,30	68,10	2,22	16,00	51,98	69,43	0,75	14,64	51,98	69,43	2,74	14,64
	Apartamento	47,32	68,10	0,89	16,00	57,86	68,10	0,75	16,00	54,17	66,84	0,373	14,64	54,17	66,84	0,94	14,64

Anexo D. Tabelas de resultados da análise de custo-ótimo

Tabela 39 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (0 cm)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	313,03	3,55	120,90	18,69	167,24	3,05
	Apartamento Social	192,78	1,40	67,07	13,47	96,40	1,15
	Apartamento	138,60	1,24	44,12	10,50	65,48	1,09
Entre 1960 e 1990	Moradia	229,24	2,56	84,06	15,79	118,43	2,14
	Apartamento Social	127,13	1,62	44,61	12,11	63,28	1,40
	Apartamento	165,83	1,77	54,66	14,56	80,21	1,51
Após 1990	Moradia	161,37	1,55	56,81	12,24	80,95	1,36
	Apartamento Social	118,64	2,36	36,69	13,97	54,92	2,03
	Apartamento	129,27	0,89	42,95	9,48	62,43	0,77

Tabela 40 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (2 cm)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	248,56	3,91	93,99	17,71	130,83	3,43
	Apartamento Social	158,08	1,54	52,73	12,80	76,89	1,30
	Apartamento	128,37	1,27	39,96	10,24	59,77	1,14
Entre 1960 e 1990	Moradia	169,29	2,88	59,13	15,00	84,62	2,47
	Apartamento Social	101,20	1,73	33,90	11,11	48,72	1,54
	Apartamento	152,72	1,86	49,28	14,23	72,87	1,60
Após 1990	Moradia	130,95	1,62	44,22	11,19	63,84	1,47
	Apartamento Social	106,52	2,47	31,83	13,55	48,20	2,14
	Apartamento	111,44	0,95	35,65	9,19	52,46	0,84

Tabela 41 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (4 cm)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	226,77	4,10	84,91	17,34	118,53	3,62
	Apartamento Social	143,03	1,63	46,54	12,53	68,46	1,39
	Apartamento	123,26	1,29	37,90	10,11	56,93	1,16
Entre 1960 e 1990	Moradia	148,24	3,07	50,41	14,68	72,79	2,66
	Apartamento Social	90,61	1,80	29,55	10,71	42,80	1,63
	Apartamento	147,04	1,90	46,96	14,10	69,70	1,65
Após 1990	Moradia	118,08	1,68	38,93	10,76	56,63	1,55
	Apartamento Social	100,46	2,54	29,42	13,34	44,87	2,22
	Apartamento	103,52	0,99	32,44	9,07	48,05	0,88

Tabela 42 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (6 cm)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	215,71	4,22	80,29	17,14	112,28	3,73
	Apartamento Social	134,53	1,70	43,07	12,38	63,71	1,46
	Apartamento	120,07	1,31	36,61	10,03	55,16	1,18
Entre 1960 e 1990	Moradia	137,23	3,20	45,87	14,49	66,60	2,79
	Apartamento Social	85,12	1,85	27,31	10,50	39,74	1,69
	Apartamento	143,90	1,93	45,68	14,02	67,94	1,67
Após 1990	Moradia	110,70	1,73	35,90	10,52	52,50	1,60
	Apartamento Social	96,68	2,58	27,93	13,22	42,80	2,27
	Apartamento	99,56	1,02	30,84	9,01	45,86	0,91

Tabela 43 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (8 cm)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	209,16	4,29	77,56	17,02	108,58	3,81
	Apartamento Social	129,30	1,74	40,94	12,29	60,79	1,50
	Apartamento	118,15	1,32	35,84	9,98	54,10	1,19
Entre 1960 e 1990	Moradia	130,59	3,28	43,14	14,38	62,88	2,88
	Apartamento Social	81,98	1,88	26,04	10,38	38,00	1,72
	Apartamento	141,93	1,95	44,88	13,98	66,84	1,69
Após 1990	Moradia	106,24	1,76	34,08	10,38	50,01	1,64
	Apartamento Social	94,42	2,61	27,05	13,14	41,56	2,30
	Apartamento	96,60	1,03	29,65	8,96	44,21	0,93

Tabela 44 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (10 cm)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	204,67	4,35	75,69	16,94	106,05	3,87
	Apartamento Social	126,03	1,77	39,61	12,23	58,97	1,53
	Apartamento	116,55	1,32	35,20	9,94	53,22	1,20
Entre 1960 e 1990	Moradia	126,43	3,34	41,43	14,31	60,55	2,93
	Apartamento Social	79,63	1,91	25,09	10,29	36,69	1,75
	Apartamento	140,53	1,96	44,31	13,94	66,06	1,70
Após 1990	Moradia	102,91	1,79	32,73	10,28	48,16	1,68
	Apartamento Social	92,53	2,64	26,31	13,07	40,53	2,32
	Apartamento	94,95	1,05	28,99	8,94	43,30	0,94

Tabela 45 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida de isolamento térmico na envolvente (12 cm)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	201,56	4,38	74,39	16,88	104,29	3,90
	Apartamento Social	123,42	1,80	38,55	12,18	57,51	1,56
	Apartamento	115,60	1,33	34,82	9,92	52,69	1,20
Entre 1960 e 1990	Moradia	123,23	3,39	40,12	14,26	58,76	2,99
	Apartamento Social	77,67	1,93	24,30	10,22	35,61	1,78
	Apartamento	139,66	1,97	43,96	13,92	65,58	1,71
Após 1990	Moradia	100,64	1,82	31,81	10,22	46,89	1,71
	Apartamento Social	91,40	2,65	25,87	13,04	39,91	2,34
	Apartamento	93,63	1,05	28,46	8,92	42,58	0,95

Tabela 46 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida aplicada aos vão envidraçados (vidro simples)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	313,03	3,55	120,90	18,69	167,24	3,05
	Apartamento Social	192,78	1,40	67,07	13,47	96,40	1,15
	Apartamento	138,60	1,24	44,12	10,50	65,48	1,09
Entre 1960 e 1990	Moradia	229,24	2,56	84,06	15,79	118,43	2,14
	Apartamento Social	127,13	1,62	44,61	12,11	63,28	1,40
	Apartamento	165,83	1,77	54,66	14,56	80,21	1,51
Após 1990	Moradia	133,24	1,36	45,17	10,41	65,13	1,24
	Apartamento Social	118,64	2,36	36,69	13,97	54,92	2,03
	Apartamento	110,91	0,79	35,44	8,37	52,17	0,70

Tabela 47 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida aplicada aos vão envidraçados (vidro duplo, 4/6/6)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	304,62	4,11	117,39	19,37	162,49	3,56
	Apartamento Social	180,99	1,69	62,19	14,31	89,77	1,40
	Apartamento	128,31	1,55	39,94	11,25	59,74	1,38
Entre 1960 e 1990	Moradia	220,54	3,00	80,44	16,47	113,52	2,53
	Apartamento Social	122,39	1,80	42,65	12,47	60,62	2,02
	Apartamento	150,45	2,34	48,35	15,74	71,60	2,15
Após 1990	Moradia	124,21	1,70	41,44	11,09	60,06	1,55
	Apartamento Social	109,87	2,85	33,17	14,67	50,05	2,45
	Apartamento	102,20	1,00	31,91	9,05	47,32	0,89

Tabela 48 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida aplicada aos vão envidraçados (vidro duplo, 6/16/6)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	301,82	4,33	116,22	19,60	160,91	3,75
	Apartamento Social	177,06	1,81	60,56	14,60	87,56	1,50
	Apartamento	124,89	1,67	38,55	11,51	57,84	1,49
Entre 1960 e 1990	Moradia	217,89	3,15	79,34	16,69	112,02	2,66
	Apartamento Social	120,84	1,86	42,00	12,59	59,74	1,62
	Apartamento	147,13	2,49	46,99	16,00	69,74	2,15
Após 1990	Moradia	122,13	1,79	40,59	11,25	58,89	1,64
	Apartamento Social	106,94	3,03	32,00	14,90	48,44	2,62
	Apartamento	99,46	1,06	30,80	9,19	45,80	0,94

Tabela 49 – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, em kWh/(m².ano), associadas à medida aplicada aos vão envidraçados (vidro duplo de b.e., 6/16/6)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}	N_{ic}	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	299,95	4,47	115,44	19,75	159,86	3,88
	Apartamento Social	174,44	1,89	59,48	14,80	86,09	1,56
	Apartamento	122,60	1,76	37,63	11,69	56,57	1,57
Entre 1960 e 1990	Moradia	216,73	3,22	78,85	16,78	111,37	2,72
	Apartamento Social	119,87	1,90	41,60	12,67	59,20	1,65
	Apartamento	144,29	2,63	45,84	16,23	68,16	2,27
Após 1990	Moradia	120,04	1,89	39,73	11,42	57,72	1,73
	Apartamento Social	105,00	3,16	31,22	15,06	47,37	2,73
	Apartamento	97,38	1,12	29,96	9,34	44,65	1,00

Tabela 50 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (2 cm)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	537,69	11,03	594,91	12,41	585,26	11,72
	Apartamento Social	475,02	9,74	525,57	10,96	517,04	10,35
	Apartamento	396,51	8,13	438,71	9,15	431,59	8,64
Entre 1960 e 1990	Moradia	1200,26	24,62	1327,98	27,70	1306,44	26,16
	Apartamento Social	272,77	5,60	301,80	6,29	296,90	5,95
	Apartamento	285,32	5,85	315,69	6,58	310,56	6,22
Após 1990	Moradia	272,77	36,16	1950,16	40,68	1918,53	38,42
	Apartamento Social	272,77	6,38	344,16	7,18	338,57	6,78
	Apartamento	272,77	8,45	455,58	9,50	448,19	8,97

Tabela 51 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (4 cm)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	758,97	15,17	817,57	16,54	806,54	15,86
	Apartamento Social	670,51	13,40	722,27	14,62	712,53	14,01
	Apartamento	559,69	11,18	602,90	12,20	594,77	11,69
Entre 1960 e 1990	Moradia	1694,22	33,85	1825,02	36,93	1800,40	35,39
	Apartamento Social	385,03	7,69	414,76	8,39	409,16	8,04
	Apartamento	402,75	8,05	433,84	8,78	427,99	8,41
Após 1990	Moradia	2487,98	49,71	2680,06	54,23	2643,91	51,97
	Apartamento Social	439,07	8,77	472,96	9,57	466,58	9,17
	Apartamento	581,22	11,61	626,09	12,67	617,64	12,14

Tabela 52 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (6 cm)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	980,95	19,30	1039,54	20,68	1028,51	20,68
	Apartamento Social	866,61	17,05	918,37	18,27	908,63	18,27
	Apartamento	723,38	14,23	766,59	15,25	758,46	15,25
Entre 1960 e 1990	Moradia	2189,71	43,09	2320,51	46,16	2295,89	46,16
	Apartamento Social	497,64	9,79	527,36	10,49	521,77	10,49
	Apartamento	520,53	10,24	551,63	10,97	545,77	10,97
Após 1990	Moradia	3215,62	63,27	3407,70	67,79	3371,55	67,79
	Apartamento Social	567,48	11,17	601,38	11,96	594,99	11,96
	Apartamento	751,20	14,78	796,07	15,84	787,63	15,84

Tabela 53 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (8 cm)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	1204,29	23,44	1262,20	24,82	1252,55	24,82
	Apartamento Social	1063,92	20,71	1115,08	21,92	1106,55	21,92
	Apartamento	888,09	17,28	930,79	18,30	923,67	18,30
Entre 1960 e 1990	Moradia	2688,28	52,32	2817,54	55,40	2796,00	55,40
	Apartamento Social	610,94	11,89	640,32	12,59	635,42	12,59
	Apartamento	639,05	12,44	669,78	13,17	664,66	13,17
Após 1990	Moradia	3947,78	76,83	4137,60	81,35	4105,97	81,35
	Apartamento Social	696,69	13,56	730,18	14,36	724,60	14,36
	Apartamento	922,24	17,95	966,58	19,00	959,19	19,00

Tabela 54 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (10 cm)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	1426,95	27,57	1485,55	28,95	1475,21	28,95
	Apartamento Social	1260,63	24,36	1312,40	25,58	1303,26	25,58
	Apartamento	1052,28	20,33	1095,49	21,35	1087,87	21,35
Entre 1960 e 1990	Moradia	3185,32	61,55	3316,11	64,63	3293,03	64,63
	Apartamento Social	723,90	13,99	753,63	14,69	748,38	14,69
	Apartamento	757,21	14,63	788,30	15,36	799,82	15,36
Após 1990	Moradia	4677,68	90,39	4869,76	94,91	5097,40	94,91
	Apartamento Social	825,50	15,95	859,39	16,75	853,41	16,75
	Apartamento	1092,75	21,12	1137,62	22,17	1129,71	22,17

Tabela 55 – Custos, em €, associados à medida de isolamento térmico na envolvente (12 cm)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	1650,99	31,71	1708,21	33,09	1698,56	33,09
	Apartamento Social	1458,56	28,01	1509,10	29,23	1500,58	29,23
	Apartamento	1217,50	23,38	1259,69	24,40	1252,57	24,40
Entre 1960 e 1990	Moradia	3685,43	70,78	3813,15	73,86	3791,60	73,86
	Apartamento Social	837,56	16,09	866,58	16,79	861,69	16,79
	Apartamento	876,09	16,83	906,45	17,56	901,33	17,56
Após 1990	Moradia	5412,10	103,95	5599,66	108,47	5568,02	108,47
	Apartamento Social	955,10	18,34	988,20	19,14	982,62	19,14
	Apartamento	1264,32	24,28	1308,14	25,34	1300,75	25,34

Tabela 56 – Custos, em €, associados à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro simples)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	129,78	32,43	139,09	34,77	137,28	34,35
	Apartamento Social	169,19	42,28	181,34	45,34	178,98	44,78
	Apartamento	288,06	71,99	308,74	77,19	304,73	76,24
Entre 1960 e 1990	Moradia	310,63	77,63	332,94	83,23	328,60	82,21
	Apartamento Social	75,00	18,74	80,39	20,10	79,34	19,85
	Apartamento	305,70	76,39	327,65	81,91	323,38	80,91
Após 1990	Moradia	499,41	124,80	535,27	133,82	528,30	132,18
	Apartamento Social	162,52	40,61	174,19	43,55	171,93	43,02
	Apartamento	284,20	71,02	304,61	76,15	300,65	75,22

Tabela 57 – Custos, em €, associados à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro duplo, 4/6/6)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	185,48	38,93	202,57	42,55	199,16	41,80
	Apartamento Social	241,81	50,75	264,10	55,47	259,65	54,50
	Apartamento	411,70	86,41	449,64	94,44	442,08	92,79
Entre 1960 e 1990	Moradia	443,96	93,18	484,88	101,84	476,72	100,06
	Apartamento Social	107,20	22,50	117,08	24,59	115,11	24,16
	Apartamento	436,91	91,70	477,17	100,23	469,15	98,47
Após 1990	Moradia	713,76	149,80	779,55	163,74	766,43	160,87
	Apartamento Social	232,28	48,75	253,69	53,29	249,42	52,35
	Apartamento	406,19	85,25	443,62	93,18	436,16	91,55

Tabela 58 – Custos, em €, associados à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro duplo, 6/16/6)

		Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
Ano de construção	Tipologia	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	219,77	46,17	236,87	49,74	233,40	48,99
	Apartamento Social	286,52	60,19	308,81	64,84	304,29	63,87
	Apartamento	487,82	102,48	525,76	110,40	518,08	108,75
Entre 1960 e 1990	Moradia	526,05	110,51	566,96	119,05	558,68	117,27
	Apartamento Social	127,02	26,68	136,90	28,75	134,90	28,32
	Apartamento	517,69	108,76	557,96	117,16	549,80	115,40
Após 1990	Moradia	845,74	177,67	911,52	191,40	898,20	188,53
	Apartamento Social	275,23	57,82	296,64	62,29	292,30	61,35
	Apartamento	481,29	101,11	518,73	108,92	511,15	107,29

Tabela 59 – Custos, em €, associados à medida aplicada aos vãos envidraçados (vidro duplo de b.e., 6/16/6)

Ano de construção	Tipologia	Região climática					
		Bragança		Lisboa		Porto	
		Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção	Custos de Construção	Custos de manutenção
Antes de 1960	Moradia	282,66	59,38	299,70	62,94	296,30	62,20
	Apartamento Social	368,51	77,41	390,73	82,06	386,29	81,09
	Apartamento	627,42	131,80	665,24	139,72	657,68	138,06
Entre 1960 e 1990	Moradia	676,58	142,12	717,37	150,66	709,22	148,88
	Apartamento Social	163,37	34,32	173,22	36,38	171,25	35,95
	Apartamento	665,84	139,87	705,98	148,27	697,95	146,51
Após 1990	Moradia	1087,76	228,49	1153,33	242,22	1140,22	239,36
	Apartamento Social	353,99	74,36	375,33	78,83	371,06	77,89
	Apartamento	619,02	130,03	656,34	137,84	648,87	136,21

Anexo E. Resultados da análise das soluções correspondentes ao ótimo económico

Tabela 60 – Resultados referentes às soluções correspondentes ao ótimo económico, segundo a metodologia do RCCTE de 2006, em kWh/(m².ano).

Ano de construção	Tipologia	Região climática								
		Bragança			Lisboa			Porto		
		N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_{ic}	N_i	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	191,59	141,62	5,76	75,62	61,76	18,08	105,96	81,96	4,77
	Apartamento social	111,01	117,08	2,62	36,95	51,51	13,54	55,31	68,10	2,03
	Apartamento	102,18	117,08	1,97	32,41	51,51	11,15	49,35	68,10	1,63
Entre 1960 e 1990	Moradia	115,10	120,48	4,38	41,21	52,93	15,42	56,54	70,02	3,80
	Apartamento Social	72,40	117,08	2,38	24,77	51,51	11,00	36,26	68,10	2,03
	Apartamento	120,42	117,08	3,03	40,72	51,51	15,30	57,55	68,10	2,47
Após 1990	Moradia	102,08	123,99	1,98	38,93	54,39	10,76	51,34	72,00	1,70
	Apartamento Social	80,84	117,08	3,64	24,86	51,51	14,29	38,50	68,10	2,94
	Apartamento	92,44	117,08	1,16	32,44	51,51	9,07	44,71	68,10	0,96

Tabela 61 – Resultados referentes às soluções correspondentes ao ótimo económico, segundo a metodologia do RCCTE em fase de análise, em kWh/(m².ano).

Ano de construção	Tipologia	Região climática								
		Bragança			Lisboa			Porto		
		N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_{ic}	N_i	N_{vc}
Antes de 1960	Moradia	211,14	222,18	0,32	83,77	92,52	7,02	116,99	126,53	0,25
	Apartamento social	190,78	211,82	0,27	69,77	86,35	5,97	100,06	118,18	0,22
	Apartamento	128,93	151,73	0,40	43,19	60,81	6,52	64,21	83,62	0,35
Entre 1960 e 1990	Moradia	126,31	142,31	0,78	45,82	58,30	9,29	62,82	76,47	0,64
	Apartamento Social	104,77	112,53	0,48	38,04	44,05	6,86	54,36	60,95	0,43
	Apartamento	132,73	157,32	0,94	45,72	64,76	10,90	64,39	85,31	0,76
Após 1990	Moradia	112,23	124,92	0,48	43,32	53,21	6,88	57,18	67,99	0,42
	Apartamento Social	108,20	128,87	0,91	35,71	51,52	9,75	53,57	71,06	0,76
	Apartamento	106,07	120,98	0,50	37,99	49,52	6,84	52,29	64,93	0,42